

基于 CASA 模型的植被净初级生产力 时空演变格局及其影响因素 ——以湖北省为例

陈晓杰¹, 张长城², 张金亭¹, 王 静¹

(1.武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2.湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队, 武汉 430051)

摘 要:为了揭示湖北省植被 NPP 的时空演变规律及驱动机制,基于 CASA 模型计算 2000—2018 年湖北省植被 NPP,结合气象数据和土地利用数据,利用重心模型、相关性分析和贡献指数等方法分析植被 NPP 的时空变化及其影响因素。结果表明:(1) 2000—2018 年湖北省植被 NPP 年均值介于 532.19~656.49 g C/(m²·a),整体呈波动上升趋势;(2) 湖北省植被 NPP 在空间分布上表现为由西北向东南递减的趋势,植被 NPP 重心迁移轨迹呈 M 型,西北地区的增量和增速较大高于东南地区。(3) 湖北省植被 NPP 与年均气温呈正相关的区域面积占全省总面积的 54.49%,主要分布在荆门、荆州地区以及宜昌东南部地区;年均 NPP 与年降水量呈正相关的面积高达 87.65%,主要分布在随州、襄阳和孝感北部地区。(4) 2000—2018 年研究区域内 NPP 总量增加 19.86×10^{-2} Tg C,在土地利用变化引起的 NPP 损益中,主要由其他土地类型向林地、耕地和草地转换引起;不同时期土地覆盖变化对 NPP 总量的贡献率有所差异,2000—2010 年建设用地贡献率最高为 53.81%,2010—2018 年耕地贡献率最高为 61.53%。

关键词:净初级生产力; CASA 模型; 气候变化; 重心模型; 湖北省

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0253-09

Analysis of the Spatiotemporal Evolution Patterns of Vegetation Net Primary Productivity and Its Influencing Factors Based on CASA Model —A Case Study of Hubei Province

CHEN Xiaojie¹, ZHANG Changcheng², ZHANG Jinting¹, WANG Jing¹

(1.School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2.Wuhan Brigade of Hydrogeology and Engineering Geology, Wuhan 430051, China)

Abstract: In order to reveal the spatiotemporal variations of NPP and its influencing factors, the NPP of vegetation in Hubei Province was calculated from 2000 to 2018 by using the CASA model. Based on the combination of meteorological data with land use data, the spatiotemporal variations of NPP and its influencing factors were analyzed by using the gravity center model, correlation analysis and contribution index. The results show that: (1) the annual NPP ranged from 532.19 to 656.49 g C/(m²·a) in Hubei Province from 2000 to 2018, and showed an increasing trend of fluctuation; (2) the spatial distribution of vegetation NPP in Hubei Province showed a decreasing trend from northwest to southeast, and the migration trajectory of vegetation NPP was M-shaped; the increment and growth rate of vegetation NPP in northwest region were higher than those in southeast region; (3) the regions with significant correlation between NPP and temperature mainly distributed in Jingmen, Jingzhou and southeastern Yichang, while the regions with significant correlation

收稿日期:2021-04-29

修回日期:2021-05-25

资助项目:国家自然科学基金项目“滨海开发带生态用地保护效率演变与空间效应研究”(41871203);自然资源部中国地质调查局项目(DD20189123)

第一作者:陈晓杰(1993—),女,内蒙古赤峰人,博士研究生,研究方向为土地生态与资源环境。E-mail:chenxiaojie@whu.edu.cn

通信作者:王静(1966—),女,浙江天台人,教授,博士生导师,研究方向为土地生态系统管理与土地资源可持续利用。E-mail:wjing0162@126.com

between NPP and rainfall mainly distributed in Suizhou, Xiangyang and northern Xiaogan; (4) the change of total NPP from woodland to cultivated land was the most important driver of the NPP gains and losses caused by land use change, and the added value was 27.42×10^{-2} Tg C; land use changes of cultivated land and construction land had the highest contribution rate to NPP.

Keywords: net primary productivity; CASA model; climate change; gravity center model; Hubei Province

植被是连接大气、土壤和水分的自然“纽带”,在调节全球气候和碳平衡等方面具有至关重要的作用^[1-3]。植被净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内由光合作用产生的有机物质总量扣除自身呼吸所需要有机物后的剩余部分^[4-5]。它是评价陆地生态系统健康状态的关键因素,也是促进生态系统物质循环和能量流动的重要角色^[6]。因此,探讨区域植被净初级生产力的时空演变格局和驱动因素有助于了解气候变化背景下的生态系统响应状况,同时对该于区域内自然资源的合理利用以及社会经济的可持续发展具有重要意义^[7]。

伴随着全球变化研究的不断开展,通过植被 NPP 研究气候变化对陆地生态系统得影响已成为热点内容^[8]。实地测量是植被 NPP 最早的测定方法,例如叶绿素测定法和生物量调查法等,由于受到多种因素的影响,这类方法很难开展^[9-10]。同时,实地测量的方法无法实现对植被 NPP 在不同尺度尤其是大尺度上变化特征的分析,因此基于遥感数据以及数学模型估算植被 NPP 已经成为一种重要的研究方法^[11-12]。NPP 估算模型主要有生态过程模型、气候统计模型以及光能利用率模型等。生态过程模型由于需要采集多种复杂的参数而很难实现^[13]。气候统计模型由于仅考虑气候因子却忽视其他因素的影响,从而产生了很大的误差。相比较而言,光能利用率模型的计算结果精度较高,不需要繁杂的野外试验测算步骤,数据获取难度小,逐渐被广泛应用于 NPP 的模拟估算研究中^[14]。其中 CASA 模型运用气象和遥感数据能实现对大尺度区域 NPP 的模拟,其不需要采集复杂的参数而得到广泛应用^[15-16]。

同时,国内外学者对植被净初级生产力的时空格局、演变规律和影响机制等开展了一系列研究。张仁平等^[17]对新疆地区的草地净初级生产力及其对气候变化的响应进行研究,得出不同草地类型的 NPP 存在明显差异,降雨可以促进新疆草原 NPP 的增加,温度对新疆地区草地 NPP 影响不大。Nemani 等^[18]开展了全球植被 NPP 与气候因素的相关性研究,表明在研究期内全球气候变化导致植被 NPP 总量增加 6%。刘旻霞等^[9]采用简单差值和 Hurst 指数等方

法,分析了青海省 NPP 的时空变化特征及其影响因素,结果表明青海省植被年均 NPP 在研究期间表现为由东到西、由南到北递减的趋势,在土地利用变化中,草地面积减少是导致 NPP 减少的主要原因。张筠等^[19]利用 MODIS 遥感影像数据研究水热波动和土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响,表明与土地覆盖变化的贡献相比,水热波动对该地区不同土地覆盖类型 NPP 总量变化的贡献更大。欧阳玲等^[20]基于土地覆被数据和改进 CASA 模型分析内蒙古东部草地 NPP 时空变化,发现人类活动对草地植被净初级生产力的干扰程度在下降。在全球气候变化背景下,植被生长过程中受到水热条件的影响日益明显。以往研究有助于我们对某一特定区域植被 NPP 的认识和理解,然而气候变化对植被 NPP 的影响具有明显的地域差异性。因此,针对不同地区研究植被 NPP 的时空演变规律及其影响机制具有重要意义。

目前关于湖北省植被 NPP 的研究并不多,相关学者如赵林等^[21]分析干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响,发现在干旱严重的年份,森林 NPP 的低值面积明显增加,同时干旱面积分布越广,森林 NPP 均值越低。车风等^[22]利用 MOD17A3H NPP 时序数据,分析了 2004—2015 年湖北省植被 NPP 时空分布特征以及驱动机制,但并未对植被 NPP 的重心分布以及迁移轨迹进行分析。王翠翠等^[23]基于 2000—2010 年湖北武汉城市圈 NPP 数据和土地覆盖数据,分析研究武汉城市圈建设用地扩张及其对 NPP 的影响。李庆君等^[24]分析了湖北省 2000—2012 年植被净初级生产力的时空变化特征并借助多元统计分析方法定量探究自然因素和人为因素对 NPP 变化的影响,但是没有分析土地利用变化对植被 NPP 的影响量及贡献率。以往关于湖北省植被 NPP 的研究主要分析植被 NPP 对单一因素的响应,很少同时关注气候因子和土地利用变化对植被 NPP 的影响。本文以湖北省为研究对象,基于改进 CASA 模型、重心引力模型以及贡献率指数等方法,结合气候因子和土地利用变化分析 2000—2018 年湖北省植被 NPP 时空演变格局及其驱动机制。研究成果有望为湖北地区生态环境保护、生态系统健康评估等提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖北省位于我国中部地区,地理位置介于 $29^{\circ}01'—33^{\circ}06'N, 108^{\circ}21'—116^{\circ}07'E$, 东西长约 740 km, 南北宽约 470 km, 总面积 18.59 万 km^2 , 占中国总面积的 1.94%(图 1)。湖北省地势表现为中间低平, 而东、西、北三面环山, 总体为向南敞开的不完整盆地。湖北省内地势高低相差悬殊, 其中东部平原的监利县谭家洲附近, 地势较低, 地面高程为零; 而西部地势较高, 其中神农架最高峰神农顶, 海拔高达 3 105 m。在全省总面积中, 山地面积最大, 占比 56%, 其次为丘陵占 24%, 而平原湖区占 20%, 属长江水系。湖北省除高山地区外, 大部分为亚热带季风性湿润气候, 雨热同季, 降水充沛, 光能充足, 无霜期长。区域内多年平均气温为 $15\sim 17^{\circ}C$, 多年平均降水量在 800~1 600 mm。区域内具有独特的地形特征, 随着海拔的上升, 降水量、温度以及植被类型等呈现出不同程度的变化差异。

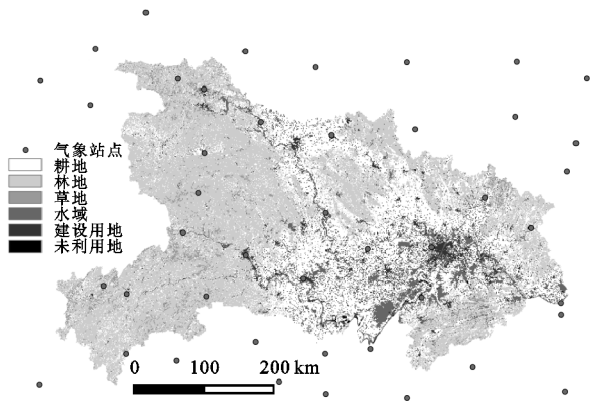


图 1 研究区土地利用类型及其气象站点的空间分布

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据 土地覆盖数据来自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km。该数据为 Land use and land cover change (LUCC) 分类体系, 分为两级, 一级为 6 类, 二级为 25 类。将土地利用数据重分类为耕地、草地、林地、建设用地、水域和未利用土地。植被覆盖数据来源于中国科学院寒旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。NDVI 数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 2000—2018 年。

1.2.2 气象数据 气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 主要包括 2000—2018 年逐月平均气温、月累积降水、太阳总辐射等数据。根据数据的可获得性, 气温和降雨数据选取湖北省及周边

省份总计 116 个站点的数据, 辐射数据是选取包括湖北省在内的中国中东部 2 422 个站点的数据, 在 ArcGIS 环境下, 对上述数据采用 Kriging 插值方法进行空间插值, 并统一定义为 Albers 投影, 经过栅格计算、重采样和掩膜提取等方法获得空间分辨率为 1 km 的气象分布空间栅格数据集。

2 研究方法

2.1 植被 NPP 的估算方法

本研究运用朱文泉等改进的 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型估算植被 NPP^[25]。其计算公式如下:

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

式中: $NPP(x, t)$ 为植物在像元 x 处 t 月份的有机物质累积总量 [$g\ C/(m^2 \cdot month)$]; $APAR(x, t)$ 为在像元 x 处 t 月份所吸收的有效光合辐射 [$MJ/(m^2 \cdot month)$]; $\epsilon(x, t)$ 表示植物在像元 x 处 t 月份的实际光能利用率。

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

式中: $SOL(x, t)$ 表示太阳在像元 x 处 t 月份的总辐射量 [$MJ/(m^2 \cdot month)$]; $FPAR(x, t)$ 为植被在像元 x 处 t 月份吸收有效光合辐射比; 0.5 表示光合有效辐射和太阳总辐射之比。

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $T_{\epsilon_1}(x, t)$ 和 $T_{\epsilon_2}(x, t)$ 分别为低温和高温胁迫影响系数; $W_{\epsilon}(x, t)$ 表示水分胁迫影响系数; ϵ_{\max} 为理想状态下最大光能利用率(%)。

2.2 变化趋势分析

本文利用一元线性回归方法分析 2000—2018 年湖北省每个栅格的年均植被 NPP、年降水和年均温的变化趋势, 其计算公式如下^[26-27]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times NPP_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中: θ_{slope} 是趋势斜率; NPP_i 为第 i 年的 NPP [$g\ C/(m^2 \cdot a)$]; i 为年变量; n 为监测年数 ($n=19$)。

2.3 相关性分析

相关性分析用于反映要素之间的相关方向和相关程度, 本文通过 Pearson 相关系数法分析植被年 NPP 与气温、降水量的相关性及其显著性水平, 其计算公式如下^[27-28]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: R_{xy} 为变量 x 和 y 的相关系数; n 为年数; x_i 为第 i 年的植被 NPP; y_i 为第 i 年的年均气象因子值(温度、降水); \bar{x}, \bar{y} 分别为变量 x 和 y 的 n 年平均值。

2.4 重心模型

重心模型是通过重心点、重心移动距离和重心移动方向等指标描述区域地理现象空间差异及其动态演变规律的方法。本文运用重心模型分析植被 NPP 的重心轨迹, 分析其变化程度和变化特征。其计算公式如下^[29-30]:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n G_i x_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, Y = \frac{\sum_{i=1}^n G_i y_i}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (6)$$

式中: X, Y 分别表示区域内相应的重心坐标; G_i 为区域内某一属性的值(NPP); x_i, y_i 为次级区域单元的地理中心坐标; n 为次级单元的数量。

年际间区域重心空间区位移动距离和方向的计算公式^[31-32]:

$$D_{i-j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

$$\theta_{i-j} = \frac{n\pi}{2} + \arctg\left(\frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}\right) \quad (8)$$

式中: D_{i-j} 与 θ_{i-j} 表示两个不同年份间空间现象重心移动的距离与方向; x_i 和 y_i 表示第 i 年研究区域重心的地理坐标; x_j 和 y_j 表示第 j 年研究区域重心的地理坐标; i, j 表示两个不同的年份。

2.5 贡献指数

本文通过 Hick 等^[33] 提出的贡献率指标分析 2000—2010 年, 2010—2018 年土地利用类型转变对植被 NPP 的影响。土地利用变化对植被 NPP 的相对贡献(R_{lucc})表示土地利用类型不变的情况下估算的 NPP 与实际 NPP 之间的差异, 具体公式如下:

$$R_{lucc} = \frac{|\Delta S \times NPP_0|}{|NPP \times S_0| + |\Delta S \times NPP_0| + |\Delta S \times \Delta NPP|} \times 100\% \quad (9)$$

式中: S_0 为研究初期土地利用类型的面积; NPP_0 为研究初期的 NPP 值; ΔS 为研究期内不同土地利用类型面积的变化量; ΔNPP 为研究期内土地利用类型的 NPP 变化量; $\Delta S \times NPP_0$ 为土地利用变化对区域内 NPP 总量的影响量。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时空演变特征

3.1.1 年均植被 NPP 空间分布格局 湖北省 2000—2018 年近 19 a 植被 NPP 表现出较强的空间分异规律(图 2), 整体表现出由西北向东南递减的趋势, 区域内植被净初级生产力均值为 $598 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2000—2018 年植被 NPP 的高值区分布在湖北省的西部, 平均植被 NPP 高于 $950 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 主要包括神农架林

区、十堰、恩施和宜昌等地区, 这些地区海拔相对较高, 且植被覆盖度较高。在湖北省东南部以武汉市为中心形成了包括鄂州、黄冈等地区在内的低值区域, 平均植被 NPP 小于 $350 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。湖北省大部分区域植被 NPP 介于 $350 \sim 750 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其主要分布在湖北省中部江汉平原地区, 主要包括荆门、潜江以及荆州东部等地区。植被 NPP 的空间分布差异特征与该地区的植被类型、气候、海拔和人类活动等影响因素息息相关。湖北省东部地区经济发展较为迅速, 人类活动频繁, 植被覆盖率较低, 因此植被 NPP 较低。湖北省西部地区主要为海拔较高的林区或山区, 植被类型丰富, 植被 NPP 相对较高。

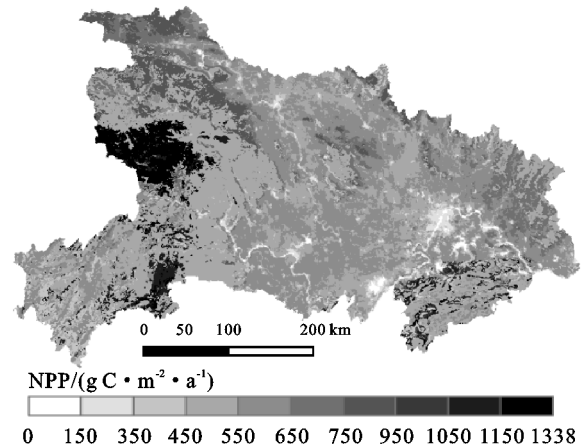


图2 2000—2018年湖北省植被NPP年平均值的空间分布

3.1.2 年均植被 NPP 空间演变特征 由于研究期较长, 本文以 5 a 或 3 a 为时间节点分析湖北省年植被 NPP 的变化特征, 结果发现 2000—2018 年湖北省 NPP 空间变化趋势整体为由西到东、由北到南呈现逐渐增加趋势, 然而不同时间段的植被 NPP 有不同的空间变化特征。2000—2005 年, 植被 NPP 增加区域主要分布在湖北省北部地区, 主要包括襄阳、随州和黄冈等地区, NPP 增加值最高达到 $379 \text{ g C}/\text{m}^2$ 。植被 NPP 减少区域主要分布在湖北省西部和南部地区, 主要包括神农架林区和恩施等地区。2005—2010 年, 湖北省植被 NPP 的增加区域主要为十堰北部地区、恩施西部地区和咸宁地区。而湖北省北部地区的植被 NPP 表现为减少趋势, 其减少的 NPP 值最高为 $529 \text{ g C}/\text{m}^2$ 。2010—2015 年, 湖北省东部如黄石、黄冈和咸宁等区域植被 NPP 表现为增加的趋势, 最大增加值为 $473 \text{ g C}/\text{m}^2$ 。然而十堰、襄阳以及中部江汉平原地区的植被 NPP 表现为减少趋势。2015—2018 年, 神农架林区、潜江以及荆门北部成为植被 NPP 减少较多的区域, 而一场北部地区、武汉东部地区以及鄂州地区呈现出增加的趋势, 增加值最高达到 $555 \text{ g C}/\text{m}^2$ 。

重心模型可以有效的描述区域地理现象空间差异以及动态演变规律, 本文通过 2000—2018 年各年植被 NPP 重心和 19 a 平均植被 NPP 重心, 分析湖北省植被 NPP 空间分布的偏向性和不平衡性。由于研究年数较多, 为了使重心点的分布以及迁移轨迹能清晰表达出来, 本文以 3 a 为间断点, 绘制湖北省 2000—2018 年植被 NPP 重心轨迹迁移图(图 3)。湖北省植被 NPP 的重心主要分布在襄阳、宜昌和荆门交界处, 即湖北省偏西部地区, 表明湖北省西部地区的植被 NPP 高于东部地区, 与前文年均植被 NPP 空间分布结果相一致。湖北省植被 NPP 重心迁移可分为 2000—2003 年、

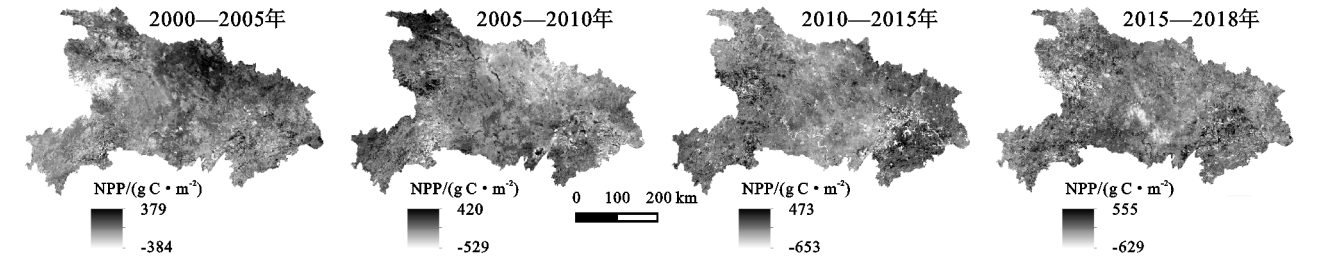


图 3 2000—2018 年湖北省植被 NPP 空间变化

本文运用极坐标系分析湖北省逐年植被 NPP 重心到 19 a 植被 NPP 均值重心原点的偏移距离(极半径)和偏移角度(极角)(图 4)。4 个象限重心数目所占的百分比分别为东北象限(26.31%)、西北象限(31.58%)、西南象限(21.05%)和东南象限(21.05%), 由此可见植被 NPP 在西北地区的增量和增速较大。而湖北省西北部地区主要为神农架是十堰地区, 该区域植被覆盖度较高, 可以有效的解释上一现象。按照南北象限划分, 位于坐标轴北部的重点占比为 57.89%, 可见北部地区植被 NPP 的增量和增速高于南部地区。同时, 2001 年、2004 年、2010 年、2014 年植被 NPP 重心距原点偏移距离较小, 表明这些年份植被 NPP 的变化情况相似。而 2002 年、2003 年、2011 年、2012 年植被 NPP 与原点的偏移距离较大, 说明这些时期的植被 NPP 的增量显著。

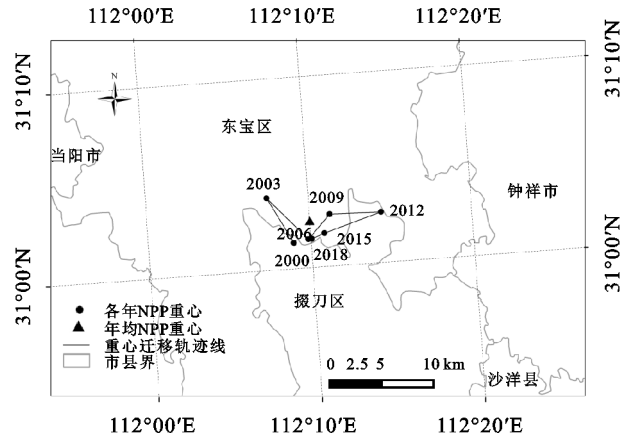


图 4 2000—2018 年湖北省植被 NPP 重心迁移轨迹

2003—2006 年、2006—2012 年及 2012—2018 年 4 个阶段, 不同时期植被 NPP 的迁移方向和路径不尽相同, 迁移路径总体呈现为 M 型。2000—2003 年植被重心向西北方向迁移, 表明该时间段内西北地区植被 NPP 的增量和增速高于东南部地区。而 2003—2006 年植被 NPP 的重心又向东南方向迁移, 表明东南地区植被 NPP 的增量有所提升。2006—2012 年植被 NPP 的重心在 6 a 间持续向东北方向迁移, 表明东北地区植被 NPP 的增量和增速高于西南地区。2012—2018 年植被 NPP 的重心又返回西南方向, 说明该时期西南区域的植被 NPP 增速高于东北区域。

3.1.3 植被 NPP 时间演变特征 2000—2018 年湖北省植被 NPP 均值整体表现为上升趋势(图 5), NPP 值的波动幅度达 $124.30 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中 2008 年出现最大值为 $656.49 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 2001 年出现最小值为 $532.19 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。对年均植被 NPP 的整体变化趋势进行总结发现, 2000—2004 年、2006—2008 年、2012—2015 年年均植被 NPP 表现为波动上升趋势, 2004—2006 年、2008—2012 年、2015—2018 年年均植被 NPP 表现为波动下降趋势。上述现象与区域水热条件相关, 例如降水是区域植被所需水分的主要来源, 同时降水也是植被生长的主要限制因子, 研究区降水充沛, 则有助于植被的恢复和生长, 降水减少和气候干旱将会导致区域内植被 NPP 降低。

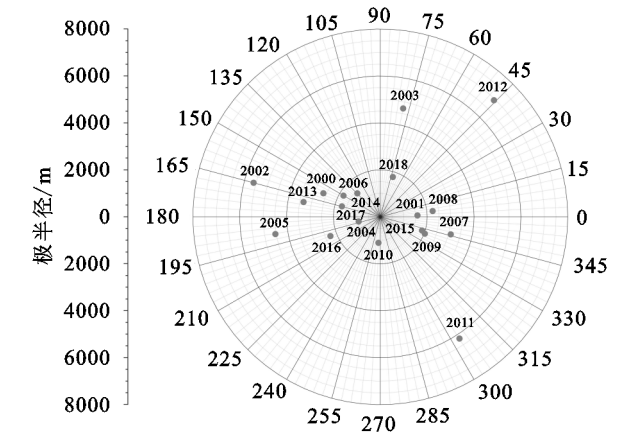


图 5 2000—2018 年湖北省植被 NPP 重心分布比例

3.2 植被 NPP 主要影响因素分析

3.2.1 气候因子对植被 NPP 的影响 本文对湖北省的年平均气温和年累计降水量进行统计,进而分析气象因子与植被 NPP 的相关性。由图 6—7 可以看出,湖北省 2000—2018 年平均气温在 16.24~17.35℃,多年均值为 16.85℃,其中最大值在 2006 年,最小值在 2012 年。湖北省 2000—2018 年年降水量在 854.02~1 334.51 mm,多年均值为 1 138.37 mm,年降水量最大值出现在 2002 年,最小值在 2001 年。总体看来,近 19 a 来湖北省气温呈缓慢上升趋势,变化率为 0.01℃/a,空间上表现为东南地区温度较高,西北地区温度较低;年降水量呈上升趋势,变化率为

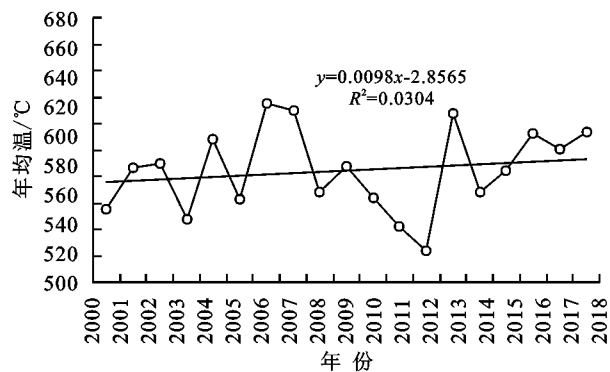


图 7 湖北省气候因子年际变化特征

水热波动对植被生长起到关键作用,本文从像元角度出发,对 2000—2018 年湖北省植被 NPP 与气象因子的相关性进行分析(图 8)。结果表明,湖北省植被 NPP 与平均气温的相关系数范围为 -0.71~0.80,平均数为 0.02。湖北省年均 NPP 与年均气温呈正相关的区域面积为 54.49%,主要分布在荆门、荆州地区以及宜昌东南部地区,这些区域温度相对适中,适当范围的温度增加可以延长植物的生长季节,提高光合作用效率以及植物的生产力。负相关区域占总面积的 45.51%,主要分布在湖北省东部武汉城市圈地区以及西部神农架林区,随着气温的升高,植物的蒸腾以及呼吸作用得到了促进,加快了植物养分的分解并缩短了叶片的寿命,最终导致地表干旱不利于植物的生长发育。总体而言,对植被 NPP 与平均气温的相关性进行分析,研究表明呈正负相关的区域面积基本持平,可见植被 NPP 与平均气温的相关性不显著。湖北省植被 NPP 与年降雨量的相关系数范围为 -0.78~0.79,平均值为 0.26。年均 NPP 与年降水量呈正相关的面积高达 87.65%,主要分布在随州、襄阳和孝感北部地区,该区域是农产品主产区,耕地数量排在全省前列,由于植被根系较短,其对降水变化非常敏感,因此降水成为该地区植被生长发育的关键制约因素。年均 NPP 与降雨量呈负相关的地区

2.57 mm/a,在空间上表现出由西北向东南递增的趋势。

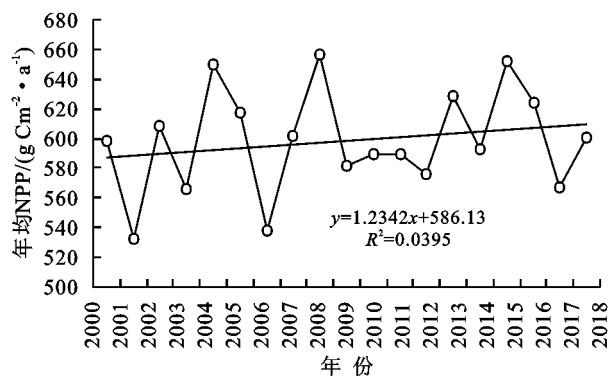
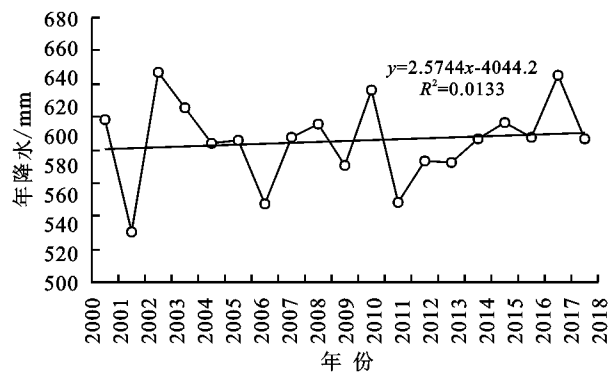


图 6 2000—2018 年湖北省植被 NPP 均值年际变化



面积为 12.35%,主要集中在武汉、鄂州仙桃等东南经济发展较好、受人类活动干扰较多的区域。同时十堰西北部地区植被 NPP 与降雨量呈负相关,该地区的主要植被类型为草地和森林,而降雨量却是湖北省最低的区域,因此其植被 NPP 与降雨量的相关性较低。总体来看,植被 NPP 与降雨量在绝大部分区域表现出正相关,表明湖北省植被 NPP 与降雨量的相关性较为显著。

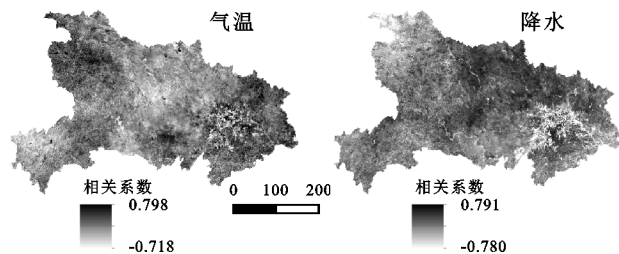


图 8 湖北省植被 NPP 与年均温度和降水相关系数空间分布格局

3.3.2 土地利用变化对植被 NPP 的影响 土地利用变化是人类活动在地理空间上强度大小的直观变现,土地利用方式在人类生产和生活过程中发生了改变,这直接影响了植物的呼吸作用和光合作用,从而使得植被 NPP 也受到影响。

分析湖北省土地利用面积变化情况,结果表明(图 9):研究期内来耕地面积减少最多,面积总计减少 4 287 km²,变化率为 -6.16%,由于建设用地占用

耕地以及国家实施退耕还林等导致耕地面积大幅减少。其次面积减少较多的用地类型是林地和草地,其中林地面积减少了 612 km²,变化率为-0.66%;草地面积减少了 207 km²,变化率为-2.94%,主要是由于耕地开垦、建设占用等因素,导致草地面积大幅锐减。水域面积增加较为明显,研究期内水域面积增加了 1 420 km²,变化率为 12.95%,主要是由于受降雨等影响,湖北省内湖泊的面积在不断扩大。建设用地为增加面积最多的地类,总计增加了 3 737 km²,变化率为 75.25%,可见 19 a 来湖北省经历了大规模的城镇扩张使得大量的耕地、林地和草地都转化为建设用地。未利用地面积也有多减少,主要转化为耕地和水域用地。

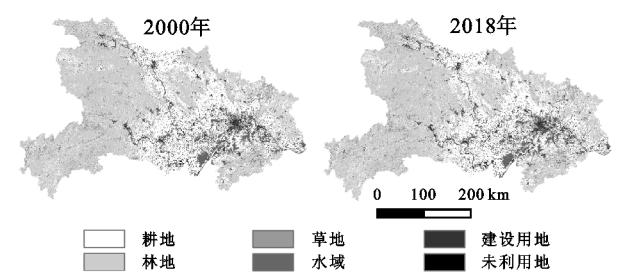


图 9 2000 年和 2018 年湖北省土地利用现状

根据 2000—2018 年研究区域内土地利用变化,对其引起的 NPP 损益情况进行分析,从 NPP 总量变化矩阵可以看出(表 1),地类由林地、草地和耕地等 NPP 较高的土地类型向水域和建设用地等 NPP 较低的土地利用类型转变时,NPP 总量大多表现为减少的趋势;相反,NPP 总量则表现为增加的趋势。其中,地利用变化如耕地转林地(26.32×10^{-2} Tg C)、耕地转草地(2.03×10^{-2} Tg C)等地类转换使得 NPP 在不同程度上有所增加。这是由于国家实施“退耕还草”和“退牧还草”政策以来,该地区植被的覆盖度有所提高。而其他地类转为建设用地或水域等使得 NPP 总量表现为减少趋势,例如耕地转为建设用地(-26.60×10^{-2} Tg C)以及林地转为建设用地等(-1.18×10^{-2} Tg C)等。主要是由于随着城市化进程的推进,建设用地大幅扩张,大量占用耕地、林地和草地面积,致使 NPP 总量降低。总体而言,在地类转化的背景下,2000—2018 年研究区域内 NPP 总量增加 19.86×10^{-2} Tg C,主要由其他土地类型向林地、耕地和草地转换引起。

不同时期土地覆盖变化对 NPP 总量的影响量和贡献率见图 10,2000—2010 年,大部分土地覆盖类型的 NPP 总量均表现为减少趋势,其中林地 NPP 减少量最多,为-1.26 Tg C,其次为耕地 NPP 减少 0.87

Tg C;而建设用地和水域面积有所增加,其相应地类 NPP 也表现为增加的趋势,分别增加 0.25,0.35 Tg C。2010—2018 年,由于退耕还林政策的广泛实施,耕地 NPP 呈现减少趋势(-1.87 Tg C),而林地 NPP 增加了 2.13 Tg C。同时随着城市化进程的推进,建设用地大幅扩张,建设用地 NPP 增加了 1.34 Tg C。2000—2010 年不同土地覆盖变化对各土地利用类型 NPP 变化的贡献有所差异,其中建设用地的贡献率最高,为 53.81%,其次是耕地(43.53%)和水域(47.59%)。2010—2018 年,土地利用变化对各土地利用类型 NPP 变化的贡献与上一时期比较有增有减,其中耕地和林地的贡献率表现为增加的趋势,而其他土地利用类型的贡献率均表现为降低的趋势。耕地的贡献率由 53.53%增加到 61.53%,而建设用地的贡献率由 53.81 降低到 47.25%。总体而言,由于耕地和建设用地面积较大,从而耕地和建设用地的地类变化对其 NPP 的贡献率相对较高。

表 1 湖北省 2000—2018 年土地类型转移下

参数	NPP 总量变化矩阵					10 ⁻² Tg C
	耕地	林地	草地	水域	建设 用地	
耕地	*	26.32	2.03	-11.14	-26.60	0.04
林地	27.42	*	4.95	3.61	-1.81	0.05
草地	1.93	4.75	*	0.21	-0.33	0.00
水域	-3.96	3.11	0.06	*	-2.20	0.00
建设用地	-8.09	0.63	0.01	-0.51	*	0.00
未利用地	-0.03	0.13	0.04	-0.72	-0.04	*

注:“*”表示相同土地类型下未发生转化部分。

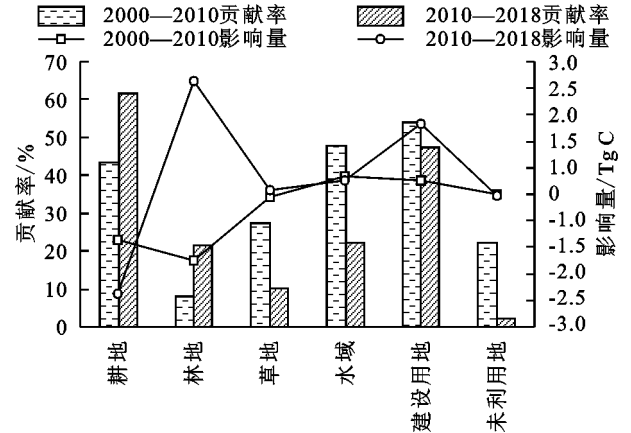


图 10 2000—2018 年湖北省不同土地利用变化对 NPP 总量的影响量和贡献率

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文选择湖北省为研究对象,基于 CASA 模型估算

湖北省 2000—2018 年植被净初级生产力,利用重心模型以及相关性分析等方法分析植被 NPP 时空演变格局以及驱动因素,探讨气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响。2000—2018 年湖北省植被 NPP 整体表现出由西北向东南递减的趋势,植被 NPP 的高值区分布在湖北省的西部,主要包括神农架林区、十堰、恩施和宜昌等地区,这些地区水热条件好,生物多样性非常丰富,遍布常绿落叶阔叶混交林,其植被覆盖度较高。湖北省中部江汉平原以及鄂东南地区的植被 NPP 普遍低于其他地区,主要是由于这些地区年降水量相对较低,并且土地利用类型多以耕地为主,其生态结构稳定性偏低,容易受到人类活动的影响。

从气候因素变化对植被 NPP 产生的影响来看,湖北省年均 NPP 与年均气温呈正相关的区域主要分布在鄂西南以及鄂中部的荆门、荆州以及宜昌东南部地区。分析原因,主要是由于如鄂西南的恩施土家族苗族自治州等地区属于植被覆盖度较高的山区,适当范围的温度升高可以延长植物的生长季节,提高光合作用效率以及植物的生产力,因此这些地区的植被 NPP 与气温呈正相关。对于湖北省东部武汉城市圈地区以及西部神农架林区,随着气温的升高,植物的蒸腾以及呼吸作用得到了促进,最终导致地表干旱不利于植物的生长发育,因此这些地区的植被 NPP 与气温呈负相关。湖北省年均 NPP 与年降水量呈正相关的地区主要分布在随州、襄阳和孝感北部地区,该区域是农产品主产区,土地类型以耕地为主,由于农作物根系较短,其对降水变化非常敏感,因此降水成为该地区植被生长发育的关键制约因素。年均 NPP 与降雨量呈负相关的地区主要集中在武汉、鄂州仙桃等东南经济发展较好、受人类活动干扰较多的区域。

从土地利用变化对植被 NPP 产生的影响来看,在地类转化的背景下,2000—2018 年研究区域内 NPP 总量增加 19.86×10^{-2} Tg C,主要由耕地以及其他土地类型向林地和草地转换引起。这是由于国家实施“退耕还草”和“退牧还草”政策以来,该地区的植被固碳能力有所增强;但随着城市化进程的推进,建设用地大幅扩张,大量占用耕地、林地和草地面积,致使 NPP 总量降低。不同时期土地覆盖变化对 NPP 总量的贡献率有所差异,2000—2010 年建设用地贡献率最高为 53.81%,2010—2018 年耕地贡献率最高为 61.53%。因此土地利用变化对植被 NPP 的影响可分为积极效应和消极效应,积极效应表现为退耕还林还草政策有助于提高植被 NPP,而消极效应

表现为城市扩张以及人类不合理利用方式导致植被 NPP 降低的现象。

4.2 结论

(1) 2000—2018 年湖北省植被 NPP 年均值空间分布上总体表现为由西北向东南递减的趋势。19 a 来年均植被 NPP 的空间变化过程中,NPP 减少的区域按照西北、西南、东南又向西北迁移的顺序。

(2) 2000—2018 年湖北省植被 NPP 重心迁移轨迹呈 M 型,在极坐标系中可以看出,植被 NPP 在西北地区的增量和增速较大高于东南地区。在年际变化上,近 19 a 来植被 NPP 总体呈波动上升趋势,在 2006 年波动幅度最大。

(3) 湖北省植被 NPP 与气象因子相关性具有一定的局域差异性,其中植被 NPP 与气温显著相关的区域主要分布在荆门、荆州地区以及宜昌东南部地区,而植被 NPP 与气温显著相关的区域主要分布随州、襄阳和孝感北部地区。总体来看,湖北省植被 NPP 与降雨的相关性比与气温的相关性更为显著。

(4) 地类由林地、草地和耕地等 NPP 较高的土地类型向水域和建设用地等 NPP 较低的土地利用类型转变时,NPP 总量大多表现为减少的趋势;相反,NPP 总量则表现为增加的趋势。土地覆盖变化对各土地利用类型 NPP 变化的贡献中,耕地和建设用地的贡献率最高。

参考文献:

- [1] 潘竟虎,徐柏翠.中国潜在植被 NPP 的空间分布模拟[J].生态学杂志,2020,39(3):1001-1012.
- [2] 王强,张廷斌,易桂花,等.横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J].生态学报,2017,37(9):3084-3095.
- [3] 潘竟虎,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[J].生态学报,2017,37(6):1888-1899.
- [4] 李传华,周敏,王玉涛,等.西北干旱区植被净初级生产力年际变化及其时空和气候因子的贡献:以河西走廊为例[J].生态学杂志,2020,39(10):3265-3275.
- [5] 吴晓全,王让会,李成,等.天山植被 NPP 时空特征及其对气候要素的响应[J].生态环境学报,2016,25(11):1848-1855.
- [6] Jiang Y, Guo J, Peng Q, et al. The effects of climate factors and human activities on net primary productivity in Xinjiang[J]. International Journal of Biometeorology, 2020:1-13.
- [7] 李婷婷,马超,郭增长.2004—2015 年贺兰山自然保护区植被 NPP 时空变化与气候响应[J].水土保持研究,

- 2020,27(6):254-261.
- [8] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J].自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.
- [9] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.
- [10] 尹小君,祝宏辉, Gerry G,等.气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响[J].农业工程学报,2020,36(20):195-202.
- [11] 刘凤,曾永年.近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响[J].生态学报,2019,39(5):1528-1540.
- [12] 郝永萍,陈育峰,张兴有.植被净初级生产力模型估算及其对气候变化的响应研究进展[J].地球科学进展,1998,13(6):564-571.
- [13] 刘恒,汤弟伟,宋鄂平,等.2000—2015 年武陵山区植被净初级生产力的时空动态特征及其驱动因子[J].水土保持研究,2020,27(6):218-225. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.06.029.
- [14] Yang H, Hu D, Xu H, et al. Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(13):14915-14932.
- [15] 张鑫彤,吴秀芹.基于 CASA 模型的 2005—2019 年云南断陷盆地 NPP 时空变化研究[J].地球学报,2021,42(3):426-434.
- [16] Chen S, Jiang H, Chen Y, et al. Spatial-temporal patterns of net primary production in Anji(China)between 1984 and 2014[J]. Ecological Indicators, 2020,110: doi. org/10.1016/j. ecolind.2019.105954.
- [17] 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[J].生态学报,2020,40(15):5318-5326.
- [18] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003,300(5625):1560-1563.
- [19] 张筠,张春华,张安定,等.水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响[J].生态学报,2020,40(21):7733-7744.
- [20] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,等.气候变化与人类活动对内蒙古东部草地净初级生产力的影响[J].生态学报,2020,40(19):6912-6924.
- [21] 赵林,徐春雪,刘雪莹,等.干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响[J].长江流域资源与环境,2014,23(11):1595-1602.
- [22] 车风,黄国清,刘韬,等.2004—2015 年湖北省植被 NPP 时空分布特征及其与气候因素关系[J].水土保持研究,2019,26(6):198-204,25.
- [23] 王翠翠,蒋卫国,冯刚,等.2000—2010 年武汉城市圈建设用地扩张对植被净初级生产力的影响[J].农业现代化研究,2015,36(4):674-679.
- [24] 李庆君,袁沫汐.湖北省植被净初级生产力时空变化特征及其影响因素分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(4):96-100,5.
- [25] 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[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [26] 李辉霞,刘国华,傅伯杰.基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J].生态学报,2011,31(19):5495-5504.
- [27] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.
- [28] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J].生态学报,2019,39(22):8504-8515.
- [29] 张兴榆,黄贤金,赵雲泰,等.近 10 年江苏省土地利用重心与经济重心迁移轨迹对比分析[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):14-20.
- [30] 吕鑫,王卷乐,康海军,等.基于 MODIS NPP 的 2006—2015 年三江源区产草量时空变化研究[J].自然资源学报,2017,32(11):1857-1868.
- [31] 张琚,任鸿瑞.人类活动对锡林郭勒盟草原净初级生产力的影响研究[J].自然资源学报,2017,32(7):1125-1133.
- [32] 杨潇,郭兵,韩保民,等.青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(12):3038-3050.
- [33] Ainian L I, Xufang L I U. Legislative idea to the ecological compensation in China [J]. Ecol. Environ, 2006,15:194-197.