

DOI: 10.5846/stxb201903210532

欧阳玲, 马会瑶, 王宗明, 王昭伟, 于显双. 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. 生态学报, 2020, 40(19): 6912-6924.

Ouyang L, Ma H Y, Wang Z M, Wang Z W, Yu X S. Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grassland in the eastern Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6912-6924.

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

欧阳玲^{1,3}, 马会瑶^{2,3,*}, 王宗明^{3,4}, 王昭伟⁵, 于显双¹

1 赤峰学院, 赤峰 024000

2 海图信息中心, 天津 300000

3 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

4 国家地球系统科学数据中心, 北京 100101

5 赤峰生态环境监测站, 赤峰 024000

摘要:内蒙古东部草地是该区域的主体生态系统类型,属于脆弱的生态系统,对气候和人类活动反应敏感。基于土地覆被数据和改进 CACS 模型,估算得到的草地 NPP,分析 2000—2015 年内蒙古东部草地和 NPP 时空格局与年际动态。进而,定义相对退化指数(RDI),确定草地生产力变化过程中人类活动因素的贡献率,分析内蒙古东部地区 2000—2015 年 RDI 空间格局与年际动态。同时,分析 16 年间 NPP 和气候因子相关关系。结果表明:1) 2000—2015 年间,损失草地面积 4743.80 km²,新增草地面积 2705.57 km²。2) 2000—2015 年内蒙古东部地区草地植被平均 NPP 位于 166.56—248.14 gC m⁻² a⁻¹ 之间,NPP 在波动中呈现明显的上升趋势(3.65 gC m⁻² a⁻¹/a, $R^2=0.47$)。3) 2000—2015 年 RDI 在 16.64%—30.54% 之间波动,RDI 值呈缓慢下降趋势,表明人类活动对草地植被净初级生产力的干扰程度在下降。4) 草地 NPP 变化主要是因为草地本身生产力下降。整体来看相关草地保护工作取得了阶段性进展,草地生境质量得到有效缓解,草地生态环境得到转变。

关键词:内蒙古东部;NPP;RDI;气候变化;草地

Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grassland in the eastern Inner Mongolia

OUYANG Ling^{1,3}, MA Huiyao^{2,3,*}, WANG Zongming^{3,4}, WANG Zhaowei⁵, YU Xianshuang¹

1 Chifeng University, Chifeng 024000, China

2 Chart Information Center, Tianjin 300000, China

3 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

4 National Earth System Science Data Center of China, Beijing 100101, China

5 Chifeng Ecological Environment Monitoring Station, Chifeng 024000, China

Abstract: Grassland is the main ecosystem type in the eastern Inner Mongolia, which belongs to the fragile ecosystem and is sensitive to climate and human activities. Based on land cover data and the improved CACS model, the grassland NPP (net primary productivity) was estimated, and the spati-temporal dynamics of grassland and NPP in the eastern Inner Mongolia from 2000 to 2015 were analyzed. Furthermore, the relative degradation index (RDI) was defined to determine the contribution rate of human activities in the process of grassland productivity change, and the spatial pattern and interannual dynamics of RDI in the eastern Inner Mongolia from 2000 to 2015 were analyzed. At the same time, the correlation between

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2016MS0403);赤峰学院院士专家工作站项目(Cfxys201703)

收稿日期:2019-03-21; **网络出版日期:**2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: beijixue_mhy@163.com

NPP and climatic factors during the past 16 years was investigated. Results showed that: 1) during 2000—2015, the loss and increase of grassland area was 4743.80 km² and 2705.57 km², respectively. 2) From 2000 to 2015, the average NPP of grassland in the eastern Inner Mongolia ranged from 166.56 to 248.14 gC m⁻² a⁻¹. NPP showed an obvious upward trend in fluctuation (3.65 gC m⁻² a⁻¹/a, $R^2=0.47$). 3) From 2000 to 2015, RDI fluctuated between 16.64% and 30.54%, and the RDI value showed a slow downward trend, indicating that the influence of human activities on grassland-NPP was decreasing. 4) The main reason of NPP change is the decrease of grassland productivity. Overall, the grassland protection work had made phased progress, and grassland habitat quality and ecological environment had been effectively improved.

Key Words: Eastern Inner Mongolia; NPP; RDI; climate change; grassland

陆地生态系统中草地生态系统是最重要、分布最广的生态系统类型之一^[1],在全球碳循环和气候调节中具有重要作用。植被生产力的降低作为土地退化的核心问题,成为全球变化与陆地生态系统研究的重点^[2],全球和区域水平的植被净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)及其主要影响因素研究正受到越来越多科学家的关注^[3]。我国草地资源严重退化,虽然采取部分措施,但草原整体退化的趋势仍然没有得到扭转^[4]。

草地退化有自然因素(如气候变化等)的原因,也有人类活动因素的原因。区分人为和气候因素,对于深入探索分析自然生态系统对全球变化和人类活动的响应,为退化生态系统的恢复重建提供相应的适应性对策,具有重要的方法借鉴意义和实践指导意义。直到近期,国内外研究者开始对气候因素与人为因素导致的草地退化进行区分。Evans^[5]和 Geerken^[6]以遥感植被指数 NDVI 为数据源,利用残差分析方法为提取人为因素导致的草原退化区域提供了较为可行的方法。曹鑫^[7]采用分时段的回归分析与残差分析相结合的方法评价人为因素在草地退化区域中的影响趋势。Anyamba^[8]、Jury^[9]、Wessels^[10]等应用 NOAA AVHRR NDVI 数据区分了南非气候波动与人类影响对土地退化的作用。赵雪雁^[11]通过因子分析法分析了高寒牧区草地退化的人文因素。以上关于草地退化影响因素的研究主要应用 NDVI 数据建立经验模型进行分析,对于植被生产力形成机理考虑较少,并不是实际的植被生产力分析,而且缺乏地面验证数据的支持。迄今为止,尚缺乏长时间序列区域层次的草地生产力变化规律及其控制因素的定量研究,除此之外,国内外均未见内蒙古东部草地植被生产力演变规律与气候和人文影响因素定量区分的公开研究报道。

内蒙古东部草原区是国际地圈-生物圈计划(IGBP)全球变化研究的典型陆地样带—中国东北温带森林-草原样带的组成部分^[12],在全球生态学领域具有十分重要的研究地位。因此针对内蒙古东部草地生产力对全球变化的响应及其主要影响因素进行深入研究,并以此为基础,提供相应的适应性对策将具有重要意义。本文选择中国内蒙古东部地区草地为研究对象,基于改进 CACS 模型^[13]和 MODIS 遥感数据产品等,估算内蒙古东部地区 2000—2015 年草地植被实际净初级生产力^[14-15],并探讨其时空格局与年际动态。定义相对退化指数(Relative Degradation index, RDI),确定草地生产力变化过程中人类活动因素的贡献率,分析内蒙古东部地区 RDI 空间格局与年际动态。同时,分析 16 年间 NPP 和气候因子相关关系。

1 研究区概况

内蒙古东部区域地理坐标为 115°21′—126°04′E, 41°17′—53°20′N, 东部与黑龙江、吉林和辽宁三省相邻,西南部与河北和内蒙古自治区锡林郭勒盟毗邻,西部与俄罗斯和蒙古接壤(图 1)。盟市包括呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市,总面积达 45.37×10⁴km²,其中草地面积为 15.25×10⁴km²,约占内蒙古东部总面积的 33.61%。内蒙古东部气候大部分为温带大陆性季风气候,年均气温-4.5—8℃,年降水为 160—628 mm。内蒙古东部地区是典型的农牧林交错区域,大兴安岭以东为耕地区域,西部是典型草原,北部是大兴安岭林区。内蒙古东部地区自然环境条件优越,属于国家实施中蒙俄经济走廊、振兴东北老工业基地和西部大开发等战略的规划范围,是内蒙古自治区经济较发达地区^[16]。

2 主要数据源及研究方法

2.1 主要数据源

2.1.1 土地覆被数据

由国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 获得 2000、2010 和 2015 年 3 期土地覆被数据。土地覆被遥感解译精度的野外验证点数据来源于野外调查,共搜集野外验证点 9846 个。

2.1.2 野外采样数据

野外采样数据主要用于植被生产力的估算验证。在草地植被达到最大生物量的月份时采用收割法对草地进行生物量的采集。内蒙古东部共收集 27 个采样点观测数据。采样方法是在每个样点设置 3—5 个重复的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方,贴地面收割样方内的绿色生物量,采用 GPS 记录样点经纬度坐标信息,并记录其植被信息和环境背景值信息;在通风条件下将样品晾晒 21 h,然后在 65°C 恒温烘烤 48 h 至恒重,以 0.02 精度电子称称量后取均值作为该样点的地上生物量值,在此基础上乘以 2.8 得到地下生物量^[17],从而获得样地总生物量数据。

2.1.3 MODIS 遥感数据集

内蒙古东部地区草地植被 NPP 估算所用的 NDVI 数据为来自 NASA/EOS LPDAAC 数据分发中心的 MODIS 产品 MOD13A3 数据集 (<https://lpdaac.usgs.gov/>),时间分辨率为月,空间分辨率为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$,时间跨度为 2000—2015 年。利用 MODIS 网站提供的专业处理软件 MRT TOOLS 对该数据进行投影转换为 Albers 投影、拼接、裁切等处理。

2.1.4 气象数据集

气象数据集包括 2000—2015 年逐月平均气温、月累积降水、逐月日照时数等数据。基于气象站点的气象数据集获取自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)。在 ArcMap 平台上,利用逐月平均气温、月累积降水、逐月日照时数数据^[18] (使用其中的总辐射月总量数据,单位为 $0.01\text{ MJ}/\text{m}^2$) 进行 txt 转 Excel、转 shp、转栅格、栅格计算、重采样、掩膜等得到年尺度平均气温、降水量和太阳辐射序列数据,空间分辨率为 250 m 。

2.1.5 其他地理空间数据

其他地理空间数据主要包括内蒙古东部地区行政区划图、数字高程模型、保护区边界图等,所有数字化的数据均来自中国科学院东北地理与农业生态研究所地理景观遥感学科组。数字化的矢量文件全部投影转换到与草地分布数据一致的坐标系统下。

2.2 研究方法

2.2.1 CASA 模型

本研究采用修订后的 CASA 模型 (Carnegie-Ames-Stanford Approach),模拟得到内蒙古东部地区 2000—2015 年植被 NPP 数据。CASA 模型利用植被吸收的光合有效辐射 APAR 和光能利用率 ε 计算 NPP,能够实现基于光能利用率原理的内蒙古东部草地净初级生产力估算^[18-19]。

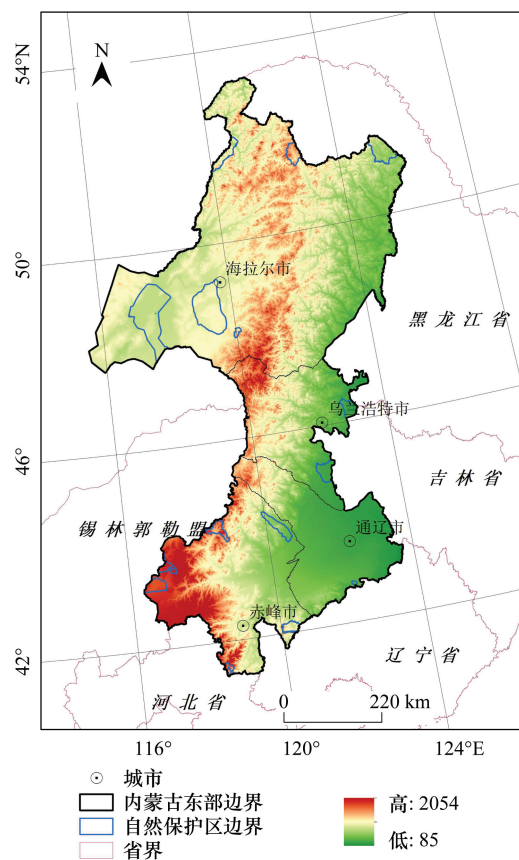


图 1 研究区概况图

Fig.1 Location, elevation, and the administrative division of the study area

2.2.2 相对退化指数

本研究借鉴“环境背景值”的概念,选取研究区内自然保护区和人工围栏草场内的未退化天然草地,定义其生产力为草地的“环境背景值”。同理,定义保护区或人工围栏草场外的草地为退化草地,其生产力类似于环境科学中的“受污染后的元素浓度”。进而,定义“相对退化指数”RDI 为:

$$RDI = \frac{|NPP_{nd} - NPP_d|}{NPP_{nd}} \times 100\%$$

(1)

在此,我们定义式中各参数的含义为:

RDI:Relative Degradation Index, 相对退化指数,%;

NPP_{nd} :Net Primary Productivity of non-degraded grassland,未退化草地 NPP,g /m²;

NPP_d :Net Primary Productivity of degraded grassland,,退化草地 NPP,g /m²。

依据以上定义,相对退化指数 RDI 作为退化草地 NPP 对于未退化草地 NPP 的“衰减”程度,用百分数表示。将单个像元作为研究单位,计算 16 个保护区的均值,赋值给各保护区的重心,之后进行克里金插值,得到各研究单元的未退化草地 NPP。因此,相对退化指数 RDI 可以表示人类活动对草地生产力的影响,即人类活动因素的贡献率。至此,定量区分气候变化和人类活动因素对草地生产力的影响得以实现。本文共选用 16 个自然保护区(阿鲁科尔沁自然保护区、白音敖包自然保护区、达里诺尔自然保护区、大黑山自然保护区、大青沟自然保护区、大兴安岭汗马自然保护区、黑里河自然保护区、红花尔基樟子松自然保护区、辉河自然保护区、科尔沁自然保护区、南瓮河自然保护区、赛罕乌拉自然保护区、图牧吉自然保护区、锡林郭勒草原自然保护区、达赉湖自然保护区、额尔古纳自然保护区),较均匀的覆盖整个研究区。

3 结果与分析

3.1 草地时空格局分析

3.1.1 草地植被空间格局分析

利用野外验证点与土地覆被信息建立混淆矩阵。结果显示,2015 年内蒙古东部土地覆被分类的总体精度为 92.27%,Kappa 系数达 0.90,制图精度均达 70%以上(表 1);2010 年土地覆被分类的总体精度为91.08%,Kappa 系数达 0.88,制图精度均达 65%以上;2000 年土地覆被分类的总体精度为 88.74%,Kappa 系数达 0.85,制图精度均达 65%以上。三期土地覆被分类结果较好,能满足本论文研究需要。

表 1 2015 年土地覆被分类结果的混淆矩阵
Table 1 Confusion matrix of land cover classification results in 2015

地表真实类型 Ground truth	分类结果 Classification result						合计 Total	用户精度 User accuracy/%
	林地 Woodland	草地 Grassland	耕地 Arable land	湿地 Wetland	建设用地 Construction land	裸地 Bare land		
林地 Woodland	3582	22	49	70	273	0	3996	89.64
草地 Grassland	16	1341	34	4	18	1	1414	94.84
耕地 Arable land	19	20	2238	12	47	3	2339	95.68
湿地 Wetland	11	4	2	716	99	0	832	86.06
建设用地 Construction land	11	23	15	3	1194	0	1246	95.83
裸地 Bare land	0	4	0	0	1	14	19	73.68
合计 Total	3639	1414	2338	805	1632	18	9846	
制图精度 Producer accuracy/%	98.43	94.84	95.72	88.94	73.16	77.78		
总体精度 Overall accuracy=92.27% Kappa=0.8963								

对内蒙古东部地区 2000、2010 和 2015 年草地空间分布数据进行制图,如图 2 所示。内蒙古东部地区草地呈明显的地域性分布;总体来看,草地主要分布于研究区西部和南部地区。区域内典型草地分布区主要有,呼伦贝尔草原、科尔沁草原、贡格尔草原以及乌兰布统草原。以内蒙古东部区域尺度而言,呼伦贝尔市西南草地分布最为明显,斑块较为集中,面积最大。

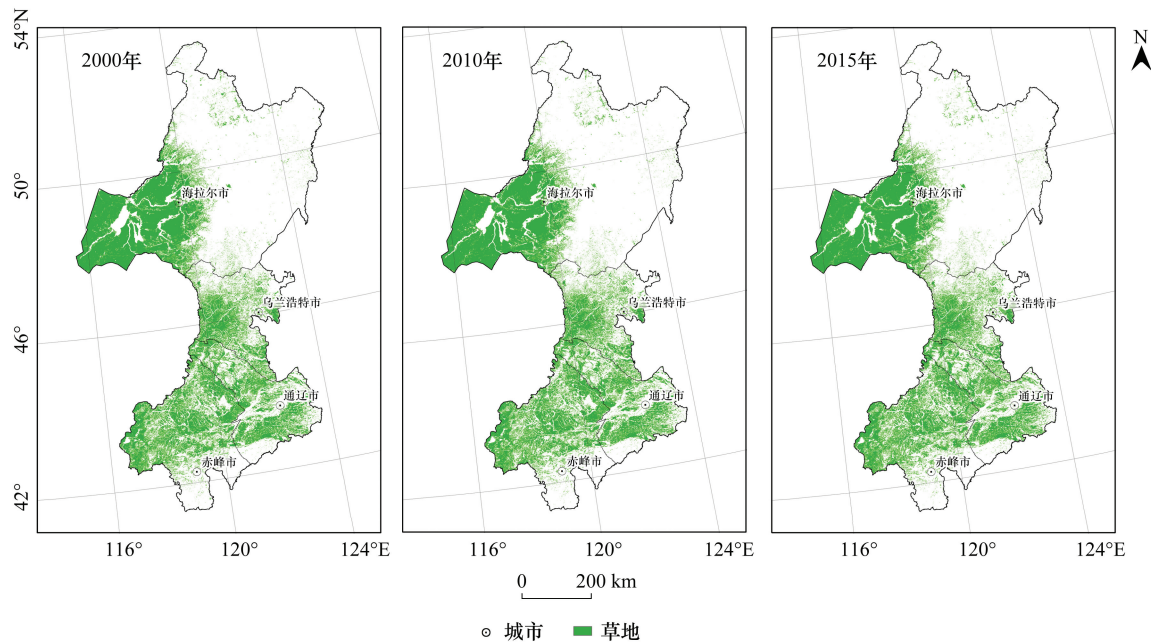


图 2 内蒙古东部地区草地空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of grassland in the eastern Inner Mongolia in 2000, 2010 and 2015

为更好的探讨内蒙古东部地区草地空间差异,分别统计 2000、2010 和 2015 年内蒙古东部地区及区域内 4 个盟市草地景观的面积、草地覆盖率(草地覆盖率是指以行政区域为单位,草地植被面积占区域土地面积的百分比),结果如表 2 所示。内蒙古东部地区草地 2000、2010 和 2015 年草地面积分别为 15.45 万 km²、15.38 万 km²、15.25 万 km²,草地面积呈现逐年下降的趋势;呼伦贝尔市草地分布面积最多,2015 年草地面积为 6.70 万 km²,占内蒙古东部地区草地总面积 43.94%;赤峰市作为草地覆盖率最大的地区,2015 年草地覆盖率 45.22%,草地面积为 3.93 万 km²。

表 2 内蒙古东部地区各盟市 2000、2010 和 2015 年草地面积和草地覆盖率

Table 2 Grassland area and coverage in the eastern Inner Mongolia in 2000, 2010 and 2015

草地分布区 Grassland distribution area	年份 Year	面积 Area/ 10 ⁴ km ²	草地覆盖率 Grassland coverage/%	草地分布区 Grassland distribution area	年份 Year	面积 Area/ 10 ⁴ km ²	草地覆盖率 Grassland coverage/%
内蒙古东部	2000	15.45	34.06	通辽市	2000	2.49	42.25
	2010	15.38	33.89		2010	2.48	42.10
	2015	15.25	33.61		2015	2.45	41.62
呼伦贝尔市	2000	6.74	26.66	赤峰市	2000	4.02	46.31
	2010	6.72	26.60		2010	4.00	46.03
	2015	6.70	26.50		2015	3.93	45.22
兴安盟	2000	2.20	39.92				
	2010	2.17	39.42				
	2015	2.17	39.33				

内蒙古东部地区作为我国草地最主要的分布区,以往研究中以内蒙古东部地区为尺度的草地景观制图与区域草地空间分布格局分析较少。呼伦贝尔草原以其大面积的草地分布和较少的人类活动干扰受到关注较多。而通辽市、兴安盟和赤峰市的草地由于分布较为分散,受高强度的农业耕作活动干扰而较少被关注。

3.1.2 草地植被变化分析

分析 2000—2015 年间草地变化结果如图 3 和表 3 所示。受人类活动和气候变化等多重因素影响,内蒙古东部地区草地空间格局上有不同程度的面积损失和增加。草地面积损失主要分布在赤峰市翁牛特旗,逐渐发展的农牧业及城镇建设是造成该区域草地损失的主要因素。草地面积增加主要分布在赤峰市阿鲁科尔沁旗,这是由于该地从 2008 年实行的万亩人工种草项目,截止 2013 年底,阿鲁科尔沁旗牧草种植面积达到 60.5 万亩^[20]。统计得出:内蒙古东部地区 2000—2015 年间,损失草地面积 4743.80km²,新增草地面积 2705.57km²。生态工程退耕还草是新增草地出现的主要原因,所占比例达到 34.27%,其次为林地(31.67%)和湿地(31.05%),裸地和建设用地转化为草地的面积相对较少,新增草地主要分布在赤峰市阿鲁科尔沁旗。草地减少的主要去向是耕地(39.88%),减少区域主要分布在西辽河平原和嫩江西岸平原,这里是内蒙古东部的主要

经济粮食作物产区。过度的农业开垦使得该地区草地减少,蚕食草原,加速土地沙漠化。人口的增加和人民生活水平的提高,使得对于粮食的需求不断增加,加速了耕地的开垦和牧区的过度放牧,同时使得建设用地的扩张范围不断加大。

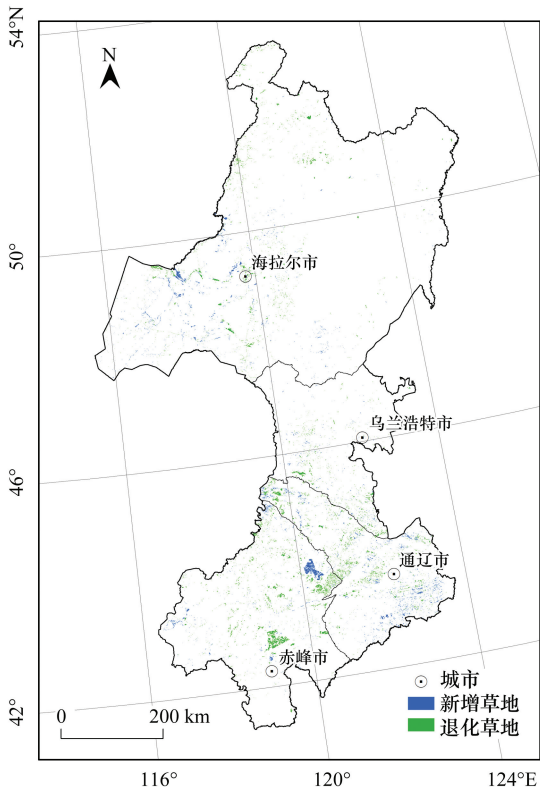


图 3 2000—2015 年草地变化分布格局

Fig.3 Change and distribution patterns of grassland from 2000 to 2015

表 3 内蒙古东部地区草地与其他地类的相互转化量和所占比例

Table 3 Transformation area and percentage between grassland and other land cover types in the eastern Inner Mongolia					
类型 Type	2000—2015		类型 Type	2000—2015	
	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%		面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
林地→草地 Woodland →Grassland	682.01	31.67	草地→林地 Grassland →Woodland	1750.78	37.28
耕地→草地 Arable land →Grassland	737.96	34.27	草地→耕地 Grassland →Arable land	1872.80	39.88
湿地→草地 Wetland →Grassland	668.55	31.05	草地→湿地 Grassland →Wetland	459.61	9.79
建设用地→草地 Construction land →Grassland	4.15	0.19	草地→建设用地 Grassland →Construction land	417.27	8.89
裸地→草地 Bare land →Grassland	60.75	2.82	草地→裸地 Grassland →Bare land	195.62	4.17
新增草地总计 Total new grassland	2153.42	—	减少草地总计 Total reduce grassland	4696.09	—

3.2 NPP 时空格局分析

3.2.1 草地植被净初级生产力空间格局分析

将模型估算的草地植被净初级生产力和采用实测生物量转换得到的植被净初级生产力进行比较。实测 NPP 和估算 NPP 间有较好的回归关系($y=0.1914x+175.65$, $R^2=0.2226$, $P<0.05$), 内蒙古东部地区草地植被 NPP 估算结果具有较高的可信度。对于估算的植被净初级生产力精度删除了异常值, 使得精度进一步提高。

为探讨内蒙古东部地区草地植被 NPP 的空间格局, 基于模型估算结果计算内蒙古东部地区草地植被 2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年平均植被年 NPP, 结果如图 4 所示。2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年草地植被 NPP 总量分别为 30.68 TgC/a ($1 \text{ TgC} = 10^{12} \text{ g C}$)、30.33 TgC/a 和 35.96 TgC/a, 相对增加 17.23%。由图 5 可以看出, 内蒙古东部地区草地植被 NPP 空间差异明显, 三期数据分布一致, NPP 高值区域主要分布于呼伦贝尔草原东部和兴安盟地区, 草地植被类型以温性草原为主, NPP 在 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上; 草地植被 NPP 低值区域主要分布在呼伦贝尔草原西部地区, 草地植被 NPP 在 $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下。其他分地区草地以温性草原为主, NPP 值域在 $200\text{—}300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。

在 16 个自然保护区内草地 NPP 差异明显, NPP 高值区域位于呼伦贝尔市东北部的南瓮河自然保护区, 最大值为 $463.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; NPP 最低处位于呼伦贝尔市西北部的达赉湖自然保护区。

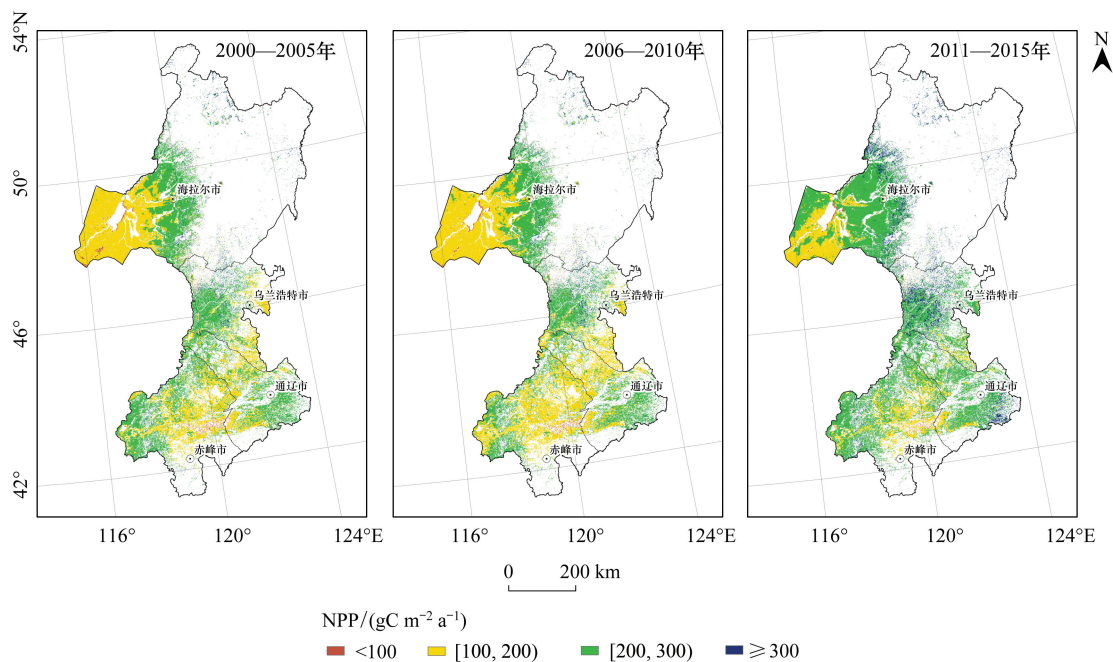


图 4 内蒙古东部地区草地植被 NPP 空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of grassland NPP in the eastern Inner Mongolia

分析内蒙古东部地区草地植被年平均 NPP 变化情况, 结果如图 5 所示。2000—2015 年, 内蒙古东部地区草地植被 NPP 小于 $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的呈现减少趋势, 由 2000 年 0.22 万 km^2 减少到 2015 年的 0.12 万 km^2 , 减少区域主要位于呼伦贝尔草原中西部; 2000—2015 年内蒙古东部地区 NPP 在 $100\text{—}200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的呈现减少趋势, 由 2000 年 7.37 万 km^2 减少到 2015 年的 3.45 万 km^2 , 减少区域主要集中分布在呼伦贝尔草原中西部和通辽市的大部分区域; 2000—2015 年内蒙古东部地区 NPP 在 $200\text{—}300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的呈现增加趋势, 由 2000 年 7.50 万 km^2 减少到 2015 年的 10.27 万 km^2 , 增加区域主要集中分布在呼伦贝尔草原中西部和通辽市的大部分区域, 主要由 NPP 在 $100\text{—}200 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的区域转化而来; 2000—2015 年内蒙古东部地区 NPP 大于 $300 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的呈现增加趋势, 由 2000 年的 0.36 万 km^2 减少到 2015 年的 1.40 万 km^2 , 增加区域主要集中分布在

呼伦贝尔草原东部和兴安盟的部分区域,主要由 NPP 在 $200\text{--}300\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的区域转化而来。

3.2.2 草地植被净初级生产力年际动态分析

草地植被 NPP 年际变化是受人类活动和气候变化共同影响所导致。由图 6 可以看出,2000—2015 年间草地植被年平均 NPP 呈上升趋势。内蒙古东部地区草地植被平均 NPP 值在 $166.56\text{--}248.14\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间变化,标准差为 $24.61\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。16 年间草地植被 NPP 最大值出现在 2014 年,最小值均出现在 2001 年。

在 16 个自然保护区内,草地植被平均 NPP 值在 $148.44\text{--}237.87\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间变化,标准差为 $23.37\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,16 年间草地植被 NPP 最大值出现在 2014 年,最小值均出现在 2001 年。这与内蒙古东部草地植被平均 NPP 相一致。

基于遥感数据的草地植被净初级生产力估算结果空间上较好地反映了区域植被生产能力的空间异质性。净初级生产力综合反映了有人类活动干扰下的气候差异对草地植被生产力影响。呼伦贝尔典型草原区、通辽、赤峰地区光合有效辐射在 $600\text{ MJ m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以下。植被光合有效辐射较低,使得植被光合作用效率低,草地植被 NPP 较小。内蒙古东部地区属于干旱、半干旱地区,年降水量较少,地表实际蒸散较低,尤其以赤峰地区最为典型。赤峰地区实际蒸散量最低,蒸散量在 250 mm 以下,气候干旱、年降水量较少,年 NPP 较低。降水是区域植被所需水分的主要来源,降水是植被生长的主要限制因子,降水减少导致区域内植被草地 NPP 降低。尤其以赤峰地区最为典型。

从草地植被净初级生产力年际变化趋势(图 6)可以明显看出:在人类活动和气候变化的驱动下,2000—2015 年间草地净初级生产力呈现缓慢上升趋势,这与该区域 2000 年来实行的退耕还草、禁牧休牧、围封转移、强草惠牧和草原生态保护补助奖励等政策有关^[21],使得内蒙古东部地区的环境得到改善,草地退化和沙漠化的速度明显降低。16 年间净初级生产力和实际净初级生产力的差值明显反映了人类活动对植被净初级生产力不同程度的影响。计算 2000—2015 年间草地净初级生产力的差值得出,人类活动造成生产力平均年增加量为 $3.99\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。近年来草原牧区加大了草地保护措施,落实相关政策,使得草地的利用更为合理,遏制草原的退化,从而促进草地生产力的增加。

3.2.3 各盟市 NPP 变化

为进一步探讨区域草地动态变化特征及区域空间差异,总结四个盟市草地变化特征(表 4),可以看出:四个盟市草地平均 NPP 均呈现上升趋势,上升趋势最显著的区域是呼伦贝尔市,16 年间草地平均 NPP 增加了 $47.90\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,相对增加 25.33%。其次是兴安盟,16 年间草地平均 NPP 增加了 $39.56\text{ gC m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,相对增加 17.99%。

3.3 RDI 时空格局分析

3.3.1 RDI 空间格局分析

为探讨内蒙古东部地区人类活动对草地植被生产力的影响,基于 NPP 结果计算内蒙古东部地区草地

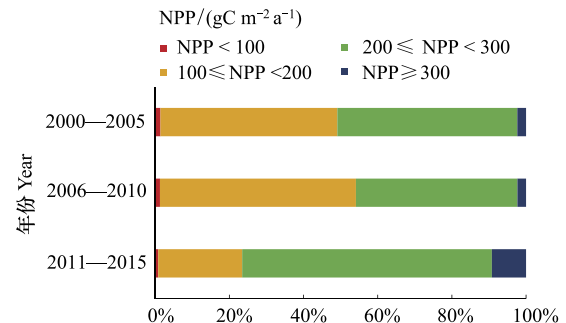


图 5 内蒙古东部地区草地植被 2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年平均 NPP 分布情况

Fig.5 Average NPP distribution of grassland in the eastern Inner Mongolia from 2000 to 2005, 2006 to 2010 and 2011 to 2015

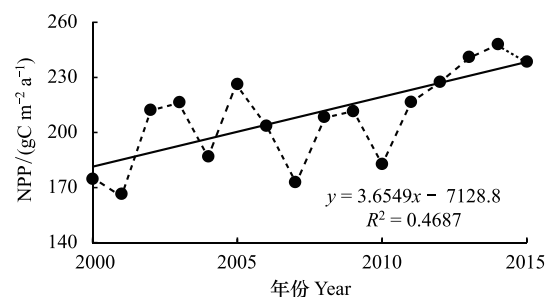


图 6 内蒙古东部地区草地植被平均 NPP 年际变化趋势

Fig.6 Interannual variation trend of mean NPP of grassland in the eastern Inner Mongolia

2000—2005、2006—2010 和 2010—2015 年平均 RDI,结果如图 7 所示。内蒙古东部地区 RDI 分布空间差异明显,可以看出,呼伦贝尔草原中部、赤峰市东部和通辽市 RDI 值大多在 0—20%之间,人类活动影响相对较小。呼伦贝尔草原西部 RDI 值大多在 20%—40%间,人类活动相对显著;呼伦贝尔草原东部、赤峰市中部和兴安盟部分草地分布区 RDI 值域较高,在 40%以上,说明人类活动干扰非常显著。

表 4 2000—2015 年内蒙古东部各盟市草地 NPP 统计结果
Table 4 Statistics of grassland NPP ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$) in the eastern Inner Mongolia during 2000—2015

盟市 League or City	2000	2010	2015	2000—2015
呼伦贝尔市	189.06	194.98	236.96	47.90
兴安盟	219.91	219.37	259.47	39.56
通辽市	207.34	203.65	242.21	34.87
赤峰市	198.40	184.97	216.24	17.85

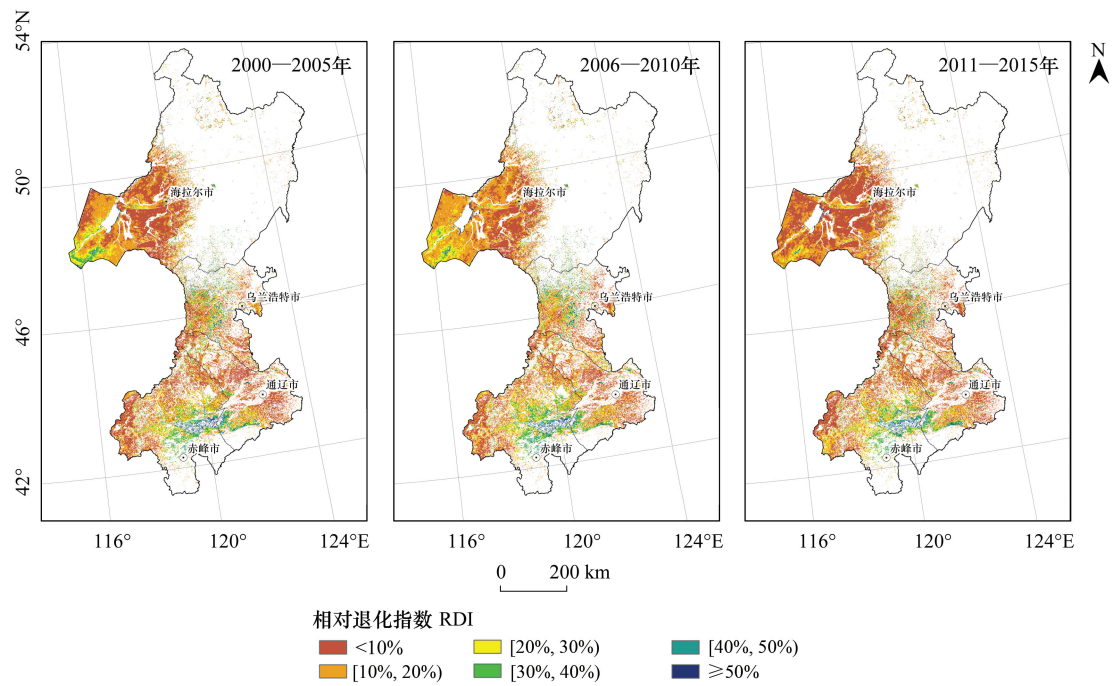


图 7 内蒙古东部地区草地相对退化指数 RDI 空间格局
Fig.7 Spatial pattern of relative degradation index (RDI) of grassland in the eastern Inner Mongolia

分析内蒙古东部地区草地植被平均 RDI 变化情况,结果如图 8 所示。2000—2015 年,内蒙古东部地区 RDI 小于 10%的呈现先减少再增加趋势,由 2000 年 6.58 万 km^2 增加到 2015 年的 7.62 万 km^2 ,增加区域主要位于呼伦贝尔草原中西部;2000—2015 年内蒙古东部地区 RDI 在 10%—20%的呈现减少趋势,由 2000 年 5.06 万 km^2 减少到 2015 年的 4.49 万 km^2 ;2000—2015 年内蒙古东部地区 RDI 在 20%—30%的呈现减少趋势,由 2000 年 2.09 万 km^2 减少到 2015 年的 1.69 万 km^2 ,减少区域主要集中分布在呼伦贝尔草原中西部,主要转化为 RDI 小于 10%的区域;2000—2015 年内蒙古东部地区 RDI 在 30%—40%的呈现减少趋势,由 2000 年的 1.01 万 km^2 减少到 2015 年的 0.85 万 km^2 ,减少区域主要集中分布在呼伦贝尔草原西部;2000—2015 年内蒙古东部地区 RDI 在 40%—50%和大于 50%的也呈现减少趋势,由 2000 年的 0.41 万 km^2 、0.31 万 km^2 减少到 2015 年的 0.36 万 km^2 、0.24 万 km^2 。综合来看,内蒙古东部草地植被平均 RDI 呈现逐渐降低趋势,说明人类对草地的影响逐渐降低。

RDI 空间格局反映了内蒙古东部地区不同程度的人类活动干扰,明显的 RDI 空间差异可归因于区域人口、政策及我国政府和地方政府实施的草地保护计划的不同。呼伦贝尔草原中部地区呈现较小的 RDI 值,主要与区域较少的人口数量和区域草地交通不可达有着密切关系,使得该地区较小的受到人为干扰,从而使得 RDI 较小。较高的 RDI 值分布在中部半干旱地带,如兴安盟和通辽市东部的部分草地分布区,区域内广泛的旱作农业活动和畜牧业等造成的土壤水分显著损失及土壤盐碱化等起到不可忽视的作用。

统计得出内蒙古东部地区 2000—2015、2006—2010 和 2011—2015 年平均 RDI 分别为 15.61%、16.50% 和 14.04%,表示人类活动对区域草地干扰作用下降,结合上文区域草地植被净初级生产力的逐年上升,可知人类活动促进了草地的恢复。

3.3.2 RDI 年际动态分析

分别统计内蒙古东部地区 2000—2015 年间各年的草地空间分布未变化区域 RDI 的平均值。如图 9 所示,平均 RDI 年际变化趋势明显,人类活动影响贡献率年际差异显著,表现为 RDI 在波动中呈缓慢降低趋势。RDI 最大值出现在 2009 年,值为 17.35%,第二高值出现在 2007 年,值为 17.25%;RDI 最小值出现在 2011 年,值为 12.96%;第二小值出现在 2013 年,值为 13.78%;2000—2015 年间 RDI 标准差为 1.30,年际间 RDI 变化相对明显。就内蒙古东部尺度而言,2000—2015 年间 RDI 均大于 12.90%,人类活动对草地空间分布植被净初级生产力的影响相对贡献率在 12.96%至 17.35%之间,导致生产力平均增加 5.29TgC。相比气候变化对草地植被净初级生产力的影响,尽管人类活动干扰不是造成草地植被净初级生产力变化的主导因素^[22],但人类活动的影响不可忽视,随着时间的推移,人类活动对草地植被净初级生产力的干扰程度在下降,这说明生态工程中退耕还草、禁牧休牧的措施使得人类对内蒙古东部地区草地植被生产力的影响在下降。

通过统计分析相对退化指数(RDI)的年际变化发现:2000—2015 年间内蒙古东部地区草地 RDI 在 12.96%至 17.35%之间波动。说明内蒙古东部地区尺度上人类活动对草地植被净初级生产力的影响仍表现为干扰或消耗。2000—2015 年间内蒙古东部地区草地空间分布区域 RDI 值成缓慢下降趋势,这表明人类活动对草地植被净初级生产力的干扰程度在下降。中国政府对内蒙古东部地区草地保护高度重视,2002 年国务院发布《国务院关于加强草原保护与建设的若干意见》文件,提出建立各项制度,推行轮牧休牧禁牧,实施退耕还草,强化草原监督管理等政策。通过草地保护工程的实施,局部草地生态质量有所改善,但是草地面积下降的趋势仍在继续,草地生态环境没有得到根本的转变,草地保护形势依然十分严峻。因此,深入探讨内蒙古东部地区人类活动对草地相对退化指数的区域差异,分析区域管理政策和潜在调控措施对于理解草地植被生产力的变化驱动机制,加强草地的保护和区域生态可持续性具有重要的现实意义。

3.3.3 各盟市 RDI 变化

为进一步探讨区域草地 RDI 动态变化特征及区域空间差异,总结 4 个盟市草地 RDI 变化特征(表 5),可

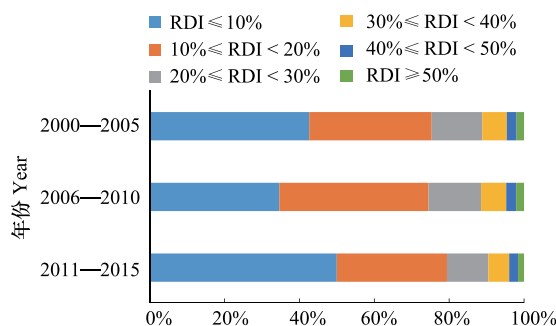


图 8 内蒙古东部地区草地植被 2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年平均 RDI 分布情况

Fig.8 Average RDI distribution of grassland in the eastern Inner Mongolia from 2000 to 2005, 2006 to 2010 and 2011 to 2015

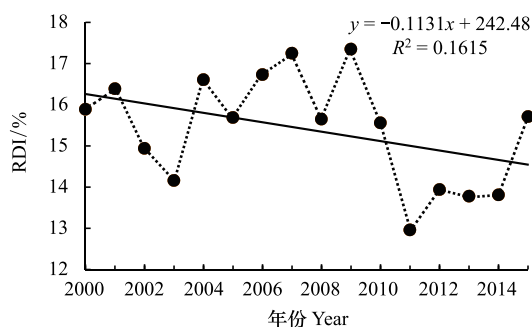


图 9 内蒙古东部地区草地相对退化指数年际变化趋势

Fig.9 Interannual variation trend of relative degradation index (RDI) of grassland in the eastern Inner Mongolia

以看出:4个盟市草地 RDI 均呈现先增加后减少趋势。2000—2010 年增加趋势最显著的是赤峰市,2011—2015 年减少趋势最为显著的是兴安盟,其次为呼伦贝尔市。

表 5 2000—2015 年内蒙古东部各盟市草地 RDI 统计结果/%

Table 5 Statistics of grassland RDI in the eastern Inner Mongolia during 2000—2015

盟市 League or City	2000	2010	2015	2000—2015	2000—2015
呼伦贝尔市	14.34	15.08	11.72	0.74	-3.37
兴安盟	17.92	18.37	14.87	0.45	-3.49
通辽市	13.81	14.17	13.63	0.37	-0.54
赤峰市	17.60	19.33	17.81	1.74	-1.53

3.4 草地与其他土地覆被类型相互转换所导致的 NPP 变化

草地与其他土地覆被类型相互转换的,会直接影响生态系统的结构与类型,从而导致 NPP 发生变化。如表 6 所示,2000—2010 年,草地 NPP 增加较少;2010—2015 年草地 NPP 增加主要是因为草地本身生产力上升, NPP 增加了 5.829 TgC,此外也有由林地、耕地、湿地转换成草地而来,分别增加了 0.173 TgC、0.144 TgC 和 0.126 TgC。2000—2010 年草地 NPP 减少主要是因为林地的转换和草地本身生产力的下降;2010—2015 年,草地 NPP 减少是因为耕地和林地的转换。整体来看,2000—2015 年,内蒙古东部草地 NPP 呈先下降后上升的趋势,草地 NPP 变化主要与本身净初级生产力相关。2000 年以来为了遏制草地的退化,政府开始在内蒙古东部实施退耕还草、禁牧休牧、围封转移、强草惠牧和草原生态保护补助奖励政策等。在此条件下,内蒙古东部的草地开始逐渐增多,草地植被净初级生产力也逐渐增加。但同时,人口的增长导致的农业、畜牧业和城市的扩张等,使得内蒙古东部草地 NPP 减少。

表 6 草地与其他土地覆盖类型相互转换所导致的 NPP 变化

Table 6 NPP changes caused by the conversion between grassland and other land cover type

类型 Type	NPP 增加 NPP added value/TgC		类型 Type	NPP 减少 NPP reduced value/TgC	
	2000—2010	2010—2015		2000—2010	2010—2015
林地→草地 Woodland →Grassland	0.004	0.173	草地→林地 Grassland →Woodland	0.188	0.241
耕地→草地 Arable land →Grassland	0.016	0.144	草地→耕地 Grassland →Arable land	0.048	0.309
湿地→草地 Wetland →Grassland	0.060	0.126	草地→湿地 Grassland →Wetland	0.013	0.083
建设用地→草地 Construction land →Grassland	0.000	0.003	草地→建设用地 Grassland →Construction land	0.043	0.032
裸地→草地 Bare land →Grassland	0.018	0.048	草地→裸地 Grassland →Bare land	0.019	0.023
NPP 增加总计 Total NPP value added	0.098	0.494	NPP 减少总计 NPP reduction total	0.311	0.689
草地不变 Grassland unchanged	-	5.829	草地不变 Grassland unchanged	-0.133	-

4 结论

本文选择内蒙古东部地区草地为研究对象,基于改进 CACS 模型和 MODIS 遥感数据产品等,估算内蒙古东部地区草地面积变化和草地实际净初级生产力,并探讨其时空格局与年际动态。选取研究区内自然保护区和人工围栏草场内的未退化天然草地,定义其生产力为草地的“环境背景值”。同理,定义保护区或人工围栏

草场外的草地为退化草地,其生产力类似于环境科学中的“受污染后的元素浓度”。进而,定义相对退化指数(RDI),确定草地生产力变化过程中人类活动因素的贡献率,分析内蒙古东部地区 RDI 空间格局与年际动态。同时,探讨 16 年间气候因子和 NPP 的关系。本文通过研究以上内容,以期加强对草地生态系统碳收支的理解,为区域草地的科学管理、保护与恢复提供科学依据。总结本文的主要研究结论如下:

(1)内蒙古东部地区草地 2000、2010 和 2015 年草地面积分别为 15.45 万 km²、15.38 万 km²、15.25 万 km²,草地面积呈现逐年下降的趋势。2000—2015 年间,损失草地面积 4743.80 km²,新增草地面积 2705.57 km²。

(2)2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年草地平均 NPP 总量分别为 30.68Tg C/a(1 Tg C = 10¹² g C)、30.33 Tg C/a 和 35.96 Tg C/a,相对增加 17.23%。NPP 高值区域主要分布于呼伦贝尔草原东部和兴安盟地区,草地植被类型以温性草原为主。2000—2015 年内蒙古东部地区草地植被平均 NPP 位于 166.56—248.14 gC m⁻² a⁻¹之间,NPP 在波动中呈现明显的上升趋势(3.65 gC m⁻² a⁻¹/a, $R^2=0.47$)。

(3)内蒙古东部地区人类活动对草地植被净初级生产力影响的空间差异明显,相对退化指数 RDI 空间异质性强,且具有明显的地域特征;RDI 高值区主要分布在呼伦贝尔草原东部和兴安盟部分草地分布区。内蒙古东部地区 2000—2015、2006—2010 和 2011—2015 年平均 RDI 为 24.62%、22.02%和 20.37%,2000—2015 年间内蒙古东部地区草地 RDI 在 16.64%至 30.54%之间波动,RDI 值呈缓慢下降趋势,表明人类活动对草地植被净初级生产力的干扰程度在下降;相关草地保护工作取得了阶段性进展,草地生境质量得到提高,草地生态环境得到改善。

(4)草地与其他土地覆盖类型相互转换所导致的 NPP 变化。2000—2015 年,内蒙古东部草地 NPP 呈先下降后上升的趋势。2000—2010 年草地 NPP 减少主要是因为林地的转化和草地本身生产力的下降;2010—2015 年草地 NPP 增加主要是因为草地本身生产力上升,NPP 增加了 5.829 TgC。草地 NPP 变化主要与本身净初级生产力相关。

致谢:感谢国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 朴世龙,方精云,贺金生,肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [2] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, Small J, Frost P E, Van Zyl D. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(2): 271-297.
- [3] Matsushita B, Tamura, M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [4] 国家环境保护总局.《2004 年中国环境状况公报》摘要. (2005). <http://news.xinhuanet.com>.
- [5] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [6] Geerken R, Ilaiwi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 490-504.
- [7] 曹鑫,辜智慧,陈晋,刘晋,史培军. 基于遥感的草原退化人为因素影响趋势分析. 植物生态学报, 2006, 30(2): 268-277.
- [8] Anyamba A, Tucker C J, Mahoney R. From El Niño to La Niña: vegetation response patterns over East and Southern Africa during the 1997-2000 period. *Journal of Climate*, 2002, 15(21): 3096-3103.
- [9] Jury M R, Weeks S, Godwe M P. Satellite-observed vegetation as an indicator of climate variability over Southern Africa. *South African Journal of Science*, 1997, 93(1): 34-38.
- [10] Wessels K J, Prince S D, Frost P E, Van Zyl D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(1): 47-67.

- [11] 赵雪雁. 高寒牧区草地退化的人文因素研究——以甘南牧区玛曲县为例. 草业学报, 2007, 16(6): 113-120.
- [12] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲. 全球变化与中国东北样带(NECT). 地学前缘, 2002, 9(1): 198-216.
- [13] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [14] De Leeuw J, Rizayeva A, Namazov E, Bayramov E, Marshall M T, Etzold J, Neudert R. Application of the MODIS MOD 17 Net Primary Production product in grassland carrying capacity assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 66-76.
- [15] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例. 生态学报, 2019, 39(8): 2995-3006.
- [16] 张晶. 内蒙古东部地区草地生产力时空格局与影响因素[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [17] Song C C, Xu X F, Tian H Q, Wang Y Y. Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang plain, Northeastern China. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 692-705.
- [18] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [19] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 韩伟兴. 1982-2009 年东北多年冻土区植被净初级生产力动态及其对全球变化的响应. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1511-1519.
- [20] 农业部草原监理中心. 立草为业——内蒙古阿鲁科尔沁旗打造“中国草都”. 中国畜牧业, 2013, (17): 70-72.
- [21] 汤曾伟, 王宏, 李晓兵, 迟登凯, 李晓慧. 锡林郭勒盟 2006-2015 年植被 NPP 变化分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2812-2821.
- [22] 杜金桑, 于德永. 气候变化和人类活动对中国北方农牧交错区草地净初级生产力的影响. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2018, 54(3): 365-372.