

内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局 及其与气候因子的关系

戴尔阜^{1,2}, 黄 宇³, 吴 卓^{1,2,4}, 赵东升^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 滑铁卢大学环境学院 规划学院, 加拿大 滑铁卢 ON N2L 3G1; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 草地净生态系统生产力(NEP)能够表征草地生态系统的固碳能力, 直接定性定量地描述草地生态系统的碳源/汇性质和大小。因此, 研究区域尺度草地生态系统NEP具有重要的实践意义。基于卫星遥感资料、地面气象观测资料及实地采样数据, 结合光能利用率模型估算了2001-2012年内蒙古草地生态系统净初级生产力(NPP)。同时, 应用土壤呼吸模型估算了逐月平均土壤呼吸量(R_s), 进而估算内蒙古草地净生态系统生产力(NEP)。研究揭示了2001-2012年内蒙古草地生态系统NPP、NEP年际变化规律、气候因子的年际变化规律, 以及草地NPP、NEP与主要气候因子的关系。结果表明: 2001年以来, 内蒙古草地生态系统整体发挥碳汇效应, 净碳汇总量达到0.55 Pg C, 年均固碳率约为0.046 Pg C/a; 研究区大部分草地NPP、NEP与降水均呈正相关关系, 与温度相关性不显著, 内蒙古草地生态系统仍有巨大的固碳潜力。

关键词: 草地生态系统; NPP; NEP; 碳源/碳汇; 内蒙古

DOI: 10.11821/dlxb201601002

1 引言

自1988年政府间气候变化专业委员会(IPCC)建立以来, 世界各国开展了多次气候变化国际谈判^[1-2]。地球陆地生态系统碳循环与温室效应问题, 一直是全球碳计划(GCP)、全球变化与陆地生态系统响应计划(GCTE)等一系列国际全球变化研究核心计划的焦点科学内容^[3]。联合国气候变化框架公约(UNFCCC)将温室气体“源”定义为任何向大气中释放产生温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制。温室气体“汇”为从大气中清除温室气体、气溶胶或其前体的过程、活动或机制^[4]。为了应对气候变化, 增加陆地生态系统碳汇已成为各国的研究热点^[5]。近年来, 大量的陆地生态系统研究所获得的结果, 有力地支持了北半球中纬度地区存在陆地碳汇的结论^[6-8]。而其中, 草地在全球陆地生态系统碳循环尤其是碳汇过程中扮演着重要角色^[9-10]。

中国草地面积约占世界草地面积的10%, 碳储量约占世界草地碳储量的9%~16%^[11]。作为重要的生态系统类型, 草地生态系统具有防风固沙、水源涵养、水土保持和生物多样性保护等多方面重要的生态功能, 同时也是陆地生态系统中一个巨大的碳库^[12-14]。中国

收稿日期: 2015-06-23; 修订日期: 2015-10-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2015CB452702, 2012CB416906); 国家自然科学基金项目(41571098, 41371196); 国家科技支撑计划(2013BAC03B04) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program), No.2015CB452702, No.2012CB416906; National Natural Science Foundation of China, No.41571098, No.41371196; National Key Technology R&D Program, No.2013BAC03B04]

作者简介: 戴尔阜(1972-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110004569M), 主要研究方向为土地利用和气候变化对生态系统影响。E-mail: daief@igsnrr.ac.cn

北方草地占据了全国草地面积总量的约78%，而位于干旱区和半干旱区的内蒙古草原是北方草原的典型代表，也是欧亚大陆草原的重要组成部分^[15-16]。同时，该区域草原位于IGBP全球变化研究典型陆地样带之内，是气候变化最为敏感的区域之一^[17]。因此，研究该区域草地碳源/汇与气候因子的关系对理解全球变化的影响具有重要的科学意义。目前，大量的研究表明净初级生产力（Net primary productivity, NPP）、净生态系统生产力（Net ecosystem productivity, NEP）可以很好地表征草原生态系统对气候变化的响应，是量化分析草地生态系统的碳源/汇的重要科学指标^[18-19]。其中NEP是表征一个生态系统碳收支的重要指标并广泛应用于碳循环研究中，它代表了生态系统和大气系统之间的碳交换过程，表明较大空间尺度上碳的净贮存，当 $NEP > 0$ 时，表明该生态系统为 CO_2 之汇，反之则为源^[20-22]。受全球气候变化的影响，草地的NPP与NEP变化与气温和降水对植物的代谢影响直接相关，特别是在干旱、半干旱的草地分布区，草地植被生产力的变化与降水的时空分布格局更加密切^[23]。因此，研究草地生态系统碳源/汇格局与气候因子的关系，准确评估内蒙古草地生态系统碳库及其动态变化，将有助于理解全球气候变化与草地生态系统之间的反馈关系，进而实现草地资源的可持续利用^[24-25]。

本研究基于卫星遥感资料、地面气象观测资料及实地采样数据，利用净初级生产力（NPP）遥感估算模型估算了2001-2012年内蒙古草地生态系统净初级生产力（NPP），应用土壤呼吸模型估算了逐月平均土壤呼吸量（ R_s ），进而估算出内蒙古草地净生态系统生产力（NEP）。分析2001-2012年草地生态系统NPP、NEP的时空变化格局及其与温度、降水的关系，揭示2001-2012年内蒙古草地生态系统的碳源/碳汇空间格局，对气候变化下草地生态系统的增汇减源具有重要的指导意义。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

研究区横跨内蒙古温性草原区（图1），北部有绵长的国界线与蒙古国接壤，包括半湿润区、半干旱区及干旱区3个气候区，东起大兴安岭，西至居延海畔，由东北向西南斜伸，呈狭长形。研究区温性草地面积（2010年）达到5214.88万 hm^2 ，占全区国土总面积的44.08%。研究区平均海拔为1000~1200 m，以内蒙古高原为主，地势平坦，东有大兴安岭，南有阴山、贺南山。水热条件呈东北—西南向带状分布，年均降水量为100~400 mm， $\geq 10^\circ C$ 的积温为2050~2400 $^\circ C$ 。在水热组合方面，伊万诺夫湿润系数由约1.0降低到约0.3^[24]。由于水热条件、地形地貌等自然因素的差异，研究区水平分布的地带性天然草原植被，从东到西可分为草甸草原、典型草原、荒漠草原三大类。

2.2 数据来源

研究数据主要包括遥感影像数据、气象数据、野外采样数据及其他图件。其中遥感影像数据来源于NASA（<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>）提供的EOS/MODIS植被指数产品MOD13Q1，时间分辨率为16天，空间分辨率为250 m \times 250 m。气温、降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网（<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>）提供的2001-2012年内蒙古自治区地面气候资料月值数据集；太阳辐射数据来源于内蒙古自治区辐射月值数据集。野外采样数据来源于2011-2012年7-8月的两次实地采样，共设置120余处样地，每块样地随机布设3个1 m \times 1 m样方，将地上部分齐地面刈割，除去黏附的土壤、砾石等杂物后带回实验室，65 $^\circ C$ 条件下烘干至恒重并称重，获取样地的地上生物量数据。其他图件包括由中国科学院资源环境科学数据中心提供的2010年内蒙古自治区

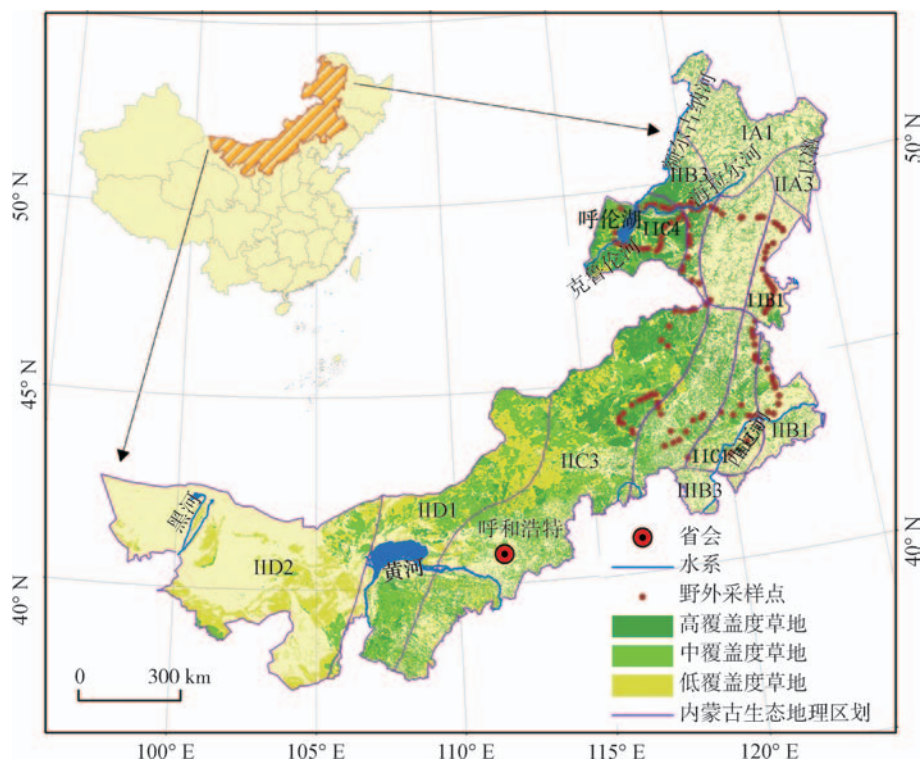


图1 内蒙古生态地理区划、野外采样点及2010年草地分布图

Fig. 1 Eco-geographical regionalization, field samples and grassland distribution in Inner Mongolia in 2010

区土地利用数据、DEM及2007年郑度等人制作的中国生态地理区域图等(表1)。

2.3 数据处理

数据的处理主要针对遥感影像数据及气象数据进行。其中遥感影像数据的处理主要包括数据投影转换、拼接、裁剪、最大值合成及S-G滤波等,以获得内蒙古2001-2012年逐月MODIS NDVI数据;气温、降水数据使用ANUSPLIN专用气候软件插值处理,

表1 内蒙古生态地理区划系统

Tab. 1 Eco-geographical region systems of Inner Mongolia

温度带	干湿区	自然区	主要植被
I 寒温带	A(湿润区)	IA1 大兴安岭北段山地落叶针叶林区	针叶林、湿地
		IIA3 松辽平原东部山前台地针阔叶混交林区	针阔混交林、湿地
		IIB1 松辽平原中部森林草原区	典型草原、农田
	B(半湿润区)	IIB2 大兴安岭中段山地草原森林区	阔叶林、草甸
		IIB3 大兴安岭北段西侧森林草原区	草甸草原、草甸
II 中温带	C(半干旱区)	IIC1 西辽河平原草原区	典型草原、农田
		IIC2 大兴安岭南端草原区	典型草原、灌丛
		IIC3 内蒙古东部草原区	典型草原、农田
		IIC4 呼伦贝尔平原草原区	典型草原、草甸
	D(干旱区)	IID1 鄂尔多斯及内蒙古高原西部荒漠草原区	典型草原、荒漠
III 暖温带	B(半湿润区)	IID2 阿拉善与河西走廊荒漠区	荒漠、荒漠草原
		IIIB3 华北山地落叶阔叶林区	农田、典型草原

注: 下文提及到的生态分区均采用自然分区代号表示^[25]。

ANUSPLIN以薄盘光滑样条函数为理论基础,引入协变量线性子模型,能较好地提高气象要素空间插值精度,且能反映气象要素随其影响因子变化的比率关系^[26],太阳辐射数据则采用Kriging空间插值处理。

2.4 研究方法

2.4.1 NPP估算方法 净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积和单位时间内所积累的有机物数量,即由植物光合作用固定的有机质总量(Gross primary productivity, GPP)中扣除自养呼吸(Autotrophic respiration, R_a)后剩余的部分,它代表从空气中进入植被的纯碳量,是表征植被活动和陆地生态系统碳循环过程的关键参数^[27]。近年来关于NPP估算的研究已有很多^[28-31],本研究采用朱文泉等改进的基于光能利用率的NPP遥感估算模型对内蒙古自治区草地生态系统2001-2012年的NPP(g C/m^2)进行估算。模型中所估算的植被净第一性生产力可以由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)两个因子来表示,估算公式如下:

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

式中: $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(g C/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率(g C/MJ)。

NPP遥感估算模型的输入参数包括月平均温度、月总降水量、月太阳总辐射量、NDVI时间序列数据及植被类型图、静态参数文件等;模型输出结果包括NPP及植被覆盖度时间序列文件等。与其他NPP估算模型相比,该模型体现三方面的特色:将植被覆盖分类引入模型,并考虑植被覆盖分类精度对NPP估算的影响;根据误差最小原则,利用中国NPP实测数据,模拟出各植被类型的最大光能利用率,使之更符合中国的实际情况;利用气象数据,结合已有的区域蒸散模型来实现水分胁迫因子的估算,对有关参数进行简化,使其实际的可操作性得到加强^[32]。

2.4.2 NEP估算方法 净生态系统生产力(NEP)是区域上估算植被碳源、碳汇的重要指标,在区域尺度上NEP常常作为碳汇大小的量度,如果不考虑其他自然和人为条件影响,生态系统碳汇可以表示为NPP与异养生物呼吸消耗(Heterotrophic respiration, R_h)之间的差值,即:

$$NEP = NPP - R_h \quad (2)$$

土壤异养呼吸消耗 R_h 的估算采用近年Bond-Lamberty等人^[33]提出的基于土壤呼吸的估算模型,即:

$$\ln R_h = 0.22 + 0.87 \times \ln R_s \quad (3)$$

式中: R_h 表示月土壤异养呼吸速率(kg C/m^2); R_s 表示月土壤呼吸速率(kg C/m^2)。土壤异养呼吸模型基于1000多组样本,且通过 $p < 0.05$ 的显著性检验,因此该方法适用于本研究。

土壤呼吸速率 R_s 的估算采用Raich等人^[34]研究的土壤呼吸模型,即:

$$R_s = f \times e^{(b \times T_a)} \times [P / (k + P)] \quad (4)$$

式中: b 为温度敏感性系数($b = \ln Q_{10}/10$); T_a 为月平均温度($^{\circ}\text{C}$); P 为月降水量(cm); f 和 k 为常数,其中 $f = 1.250$, $k = 4.259$ 。

2.4.3 NPP、NEP年际变化趋势 2001-2012年NPP、NEP的年际变化趋势,采用Theil-Sen Median趋势分析方法,该方法对判断长时间序列数据趋势有一定优势,对数据误差具有较强抵抗力,同时该方法不需要数据服从一定的分布,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,其计算公式如下^[35]:

$$S_{NPP/NEP} = Median \left[\frac{(NPP/NEP)_j - (NPP/NEP)_i}{j - i} \right], \forall j > i$$

(5)

式中： $(NPP/NEP)_i$ 和 $(NPP/NEP)_j$ 分别表示第*i*年和第*j*年的NPP或NEP值，当 $S_{NPP/NEP} > 0$ 时，NPP或NEP呈增长趋势，反之则成降低趋势。

2.4.4 偏相关分析 采用基于像元的空间分析法，分析草地生态系统NPP、NEP与温度、降水的偏相关性，计算偏相关系数，计算公式如下^[36]：

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

(6)

式中： R_{xy} 为*x*、*y*两变量的相关系数； x_i 为第*i*年的NPP； y_i 为第*i*年的降水量或平均温度； \bar{x} 为多年NPP的平均值； \bar{y} 为多年降水量或平均温度的平均值；*n*为样本数。

3 结果分析

3.1 内蒙古草地多年平均NPP的空间分布格局

由2001-2012年内蒙古草地生态系统NPP平均值的空间分布（图2）可知，内蒙古草地NPP总体呈现由东至西依次递减的空间分布格局。研究区12年来草地NPP平均值为278.83 g C/m²，总值约为0.145 Pg C。内蒙古不同生态地理分区草地NPP空间差异明显（表2），且具有明显的经度地带性。其中东北部草原区最大，中部典型草原区次之，西部荒漠草原区最低。东部草地植被以草甸草原为主的，草地生产力较高，主要位于IIB3大兴安岭北段西侧草原区及IIB1松辽平原中部草原区，NPP年平均值分别为487.44 g C/m²、405.04 g C/m²。中部草地植被以典型草原为主，是内蒙古草原的主体，草地NPP年平均值在200~500 g C/m²之间，其中IIC2大兴安岭南段草原区、IIC1西辽河平原草原区及

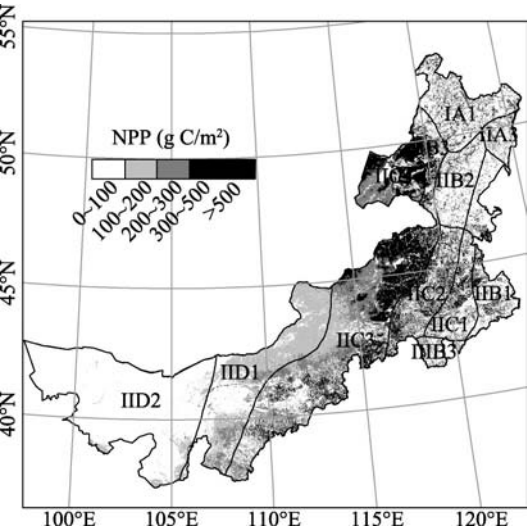


图2 2001-2012年内蒙古草地生态系统NPP平均值及空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the average NPP in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

表2 2001-2012年内蒙古草地生态系统生态地理分区NPP平均值
Tab. 2 Average NPP of eco-geographical region in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

生态分区	NPP(g C/m ²)
IA1	590.99
IIA3	591.27
IIB1	405.05
IIB2	593.64
IIB3	487.52
IIC1	363.16
IIC2	466.15
IIC3	301.88
IIC4	323.65
IID1	153.05
IID2	76.45
IIIB3	528.94

IIC4呼伦贝尔平原草原区、IIC3内蒙古东部草原区的东部草原NPP年平均值依次为466.14 g C/m²、363.14 g C/m²、323.67 g C/m²、301.91 g C/m²，IIC3及IIC4区的西部地区草地NPP次之，平均值在200~300 g C/m²之间。西部草地植被以荒漠草原为主，草地NPP年平均值在0~200 g C/m²之间，主要分布于IID1鄂尔多斯及内蒙古高原西部荒漠草原区及IID2阿拉善与河西走廊荒漠区，NPP年平均值分别为153.08 g C/m²、76.48 g C/m²。

3.2 内蒙古草地多年累积NEP的空间分布格局

从2001-2012年内蒙古草地生态系统累积NEP的空间分布(图3)可以看出，内蒙古草地累积NEP总体上呈现由东至西依次递减的空间分布格局。2001-2012年，内蒙古草地生态系统碳汇区(NEP > 0)面积约为31.43万km²，约占总草地面积的60.28%；碳源区(NEP < 0)面积约为20.71万km²，约占总草地面积的39.72%。碳汇区草地生态系统2001-2012年的平均累积固碳量为2186.47 g C/m²，整个研究区固碳量约为0.687 Pg C；碳源区草地生态系统12年平均碳排放量为660.32 g C/m²，整个研究区碳释放量为0.137 Pg C。2001-2012年内蒙古草地生态系统净碳汇总量达到0.55 Pg C，年固碳率为0.046 Pg C/a。内蒙古不同生态分区草地碳源/碳汇特征空间差异明显(表3)，且具有明显的经度地带性。碳汇区主要分布于IIB3大兴安岭北段西侧草原区、IIC2大兴安岭南段草原区、IIC4呼伦贝尔平原东部草原区及IIC3内蒙古东部草原区，12年平均累积固碳量依次为3967.65 g C/m²、3028.35 g C/m²、2085.38 g C/m²、1146.61 g C/m²。IIB1松辽平原中部草原区、IIC1西辽河平原草原区整体表现为碳汇区，但固碳能力较弱，12年平均累积固碳量分别为607.85 g C/m²、428.10 g C/m²；碳源区主要分布于IID1鄂尔多斯及内蒙古高原西部荒漠草原区、IID2阿拉善与河西走廊荒漠区，12年平均总碳释放量依次为383.05 g C/m²、530.69 g C/m²，IIB1、IIC1的南部地区及IIC3的西南部地区草地亦表现出碳源特征。

3.3 内蒙古草地NPP、NEP的年际变化规律

分析2001-2012年内蒙古草地生态系统NPP、NEP的变化趋势(图4)，内蒙古草地生态系统的NPP与NEP均呈增长趋势。整个研究区NPP年平均值在200~350 g C/m²之间

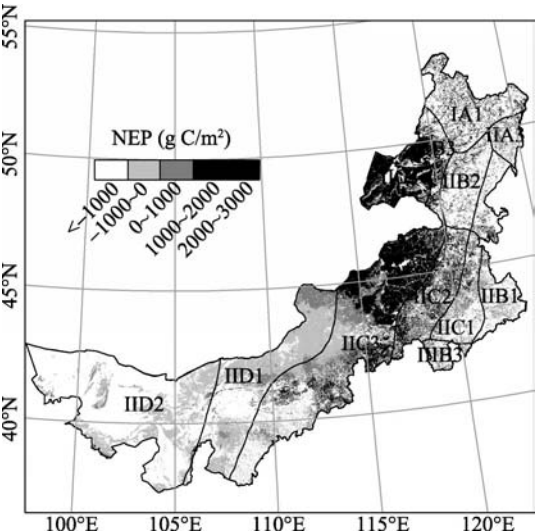


图3 2001-2012年内蒙古草地生态系统累积NEP及空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the total NEP in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

表3 2001-2012年内蒙古草地生态系统生态地理分区NEP平均值

Tab. 3 Average NEP of eco-geographical region in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

生态分区	NEP(g C/m ²)
IA1	4448.90
IIA3	3972.41
IIB1	1297.88
IIB2	4353.57
IIB3	3194.29
IIC1	885.54
IIC2	2626.31
IIC3	715.18
IIC4	1295.56
IID1	-960.22
IID2	-1436.88
IIB3	2849.03

波动, 年增长率为 3.781 g C/m^2 ; NEP 年平均值在 $50\sim150\text{ g C/m}^2$ 之间波动, 年增长率为 2.104 g C/m^2 。从时间序列来看, 12 年来 NPP 与 NEP 的变化趋势并不完全同步, NEP 并不随着 NPP 的增加而增加。

3.3.1 内蒙古草地 NPP 时空变化格局 分析 2001-2012 年内蒙古草地生态系统 NPP 时空变化格局 (图 5), 大部分地区草地 NPP 呈增长趋势, 平均增长率约为 $3.56\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 。NPP 呈增长趋势的草地面积为 43.56 万 km^2 , 占总草地面积的 83.6% , 其中有 47.3% 的草地 NPP 增长率在 $0\sim5\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 之间, 26.64% 的草地 NPP 增长率在 $5\sim10\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 之间, 8.21% 的草地 NPP 增长率在 $10\sim15\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 之间, 仅有 1.45% 的草地 NPP 增长率在 $15\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 以上。NPP 呈减少趋势的草地面积为 8.55 万 km^2 , 占总草地面积的 16.4% , 其中 12.76% 的草地 NPP 减少率在 $0\sim10\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 之间, 仅 3.64% 的草地 NPP 减少率在 $10\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 以上。12 年来内蒙古大部分地区草地 NPP 均呈增长趋势 (表 4), 其中 NPP 增长趋势最为明显的地区主要在东北部 IIC4 呼伦贝尔平原草原区、IIB1 松辽平原中部草原区、IIB3 大兴安岭北段西侧草原区, 平均增长率依次为 $8.66\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 、 $7.12\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 、 $5.72\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$, NPP 减少趋势较为明显的地区主要集中在 IIC2 大兴安岭南段草原区, 平均减少率为 $1.45\text{ g C/m}^2\cdot12\text{a}$ 。

3.3.2 内蒙古草地 NEP 时空变化格局 分析 2001-2012 年内蒙古草地生态系统 NEP 时空变化格局 (图 6), 12 年来内蒙古大部分地区

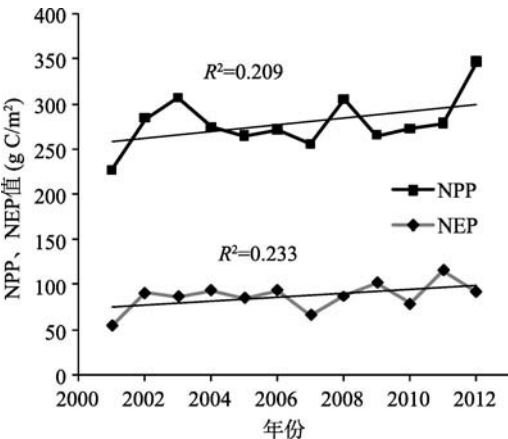


图4 2001-2012年内蒙古草地生态系统 NPP、NEP的变化趋势

Fig. 4 The change trend of NPP and NEP in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

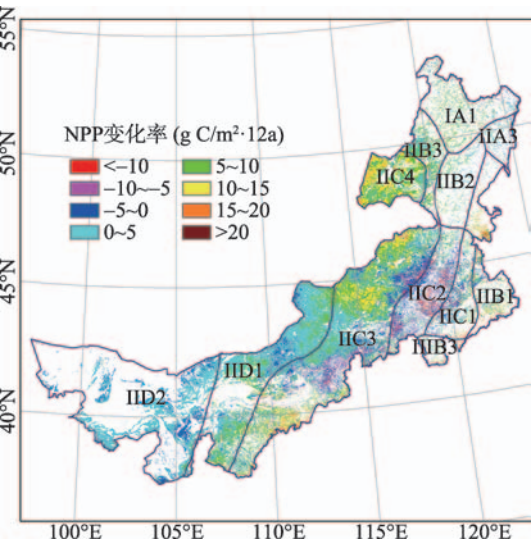


图5 2001-2012年内蒙古草地生态系统 NPP 平均变化率时空变化格局

Fig. 5 Spatial and temporal pattern and the average change rate of NPP in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

表4 2001-2012年内蒙古草地生态系统 生态地理分区 NPP 变化趋势

Tab. 4 Trend of NPP in eco-geographical region in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012	
生态分区	NPP 变化率($\text{g C/m}^2\cdot12\text{a}$)
IA1	5.55
IIA3	3.17
IIB1	7.44
IIB2	4.34
IIB3	6.36
IIC1	3.01
IIC2	-1.99
IIC3	3.07
IIC4	11.40
IID1	3.04
IID2	0.93
IIIB3	3.73

NEP呈增长趋势,且其时空变化格局与NPP的时空变化格局较为一致,平均增长率约为 $2.16\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$,略低于NPP的增长率。说明草地NPP的增加可以在一定程度上增加草地碳汇,起到固碳的作用。研究区NEP呈增长趋势的草地面积为 36.9 万 km^2 ,占总草地面积的70.8%。其中有43.23%的草地NEP增长率在 $0\sim 5\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 之间,21.05%的草地NEP增长率在 $5\sim 10\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 之间,5.69%的草地NEP增长率在 $10\sim 15\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 之间,仅有0.83%的草地NEP增长率在 $15\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 以上。研究区NEP呈减少趋势的草地面积为 8.55 万 km^2 ,占总草地面积的29.2%,高于NPP呈减少趋势的草地面积,其中有27.65%的草地NEP减少率在 $0\sim 10\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 之间,仅有1.55%的草地NEP减少率在 $10\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 以上。12年来内蒙古大部分地区草地NEP均呈增长趋势(表5),但增长率大小并不一致。其中NEP增长最多的地区同样集中在东北部IIC4呼伦贝尔平原草原区、IIB3大兴安岭北段西侧草原区,平均增长率分别为 $6.62\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 、 $3.67\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$;中西部IID1、IIC3、IID2区的平均增长率次之,依次为 $3.66\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 、 $3.25\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 、 $0.44\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 。NEP减少趋势较为明显的地区主要集中在东南部IIC2大兴安岭南端草原区、IIB1松辽平原中部草原区、IIC1西辽河平原草原区,平均减少率为 $3.14\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 、 $2.84\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 、 $1.85\text{ g C/m}^2\cdot 12\text{a}$ 。

3.4 内蒙古草地NPP、NEP与气候因子的相关关系

3.4.1 2001-2012年内蒙古草地年均温和年降水空间格局 2001-2012年内蒙古草地生态系统平均年均温、年降水的空间分布如图7所示。12年以来内蒙古草地生态系统平均年降雨量为 263.97 mm ,年均温为 $3.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究区内气候因子空间差异明显,降雨量呈现由西南向东北递增的趋势(图7a),温度却呈现由西南向东北递减的趋势(图7b)。

东部草甸草原区,主要位于半湿润气候区的大兴安岭北段西侧IIB3区,冬季寒冷、干燥、漫长,夏季温暖、湿润、短暂,平均年降雨量较高,在 $350\sim 580\text{ mm}$ 之间波动,年均温则较低,在 $-3\sim -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动,具有明显的寒温带大陆性季风气候特征;位于半湿润、半干旱气候过渡区的IIB1,降雨量充沛,年均温较高,年降雨量和年均温的波动范围分别为 $300\sim 550\text{ mm}$ 和 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

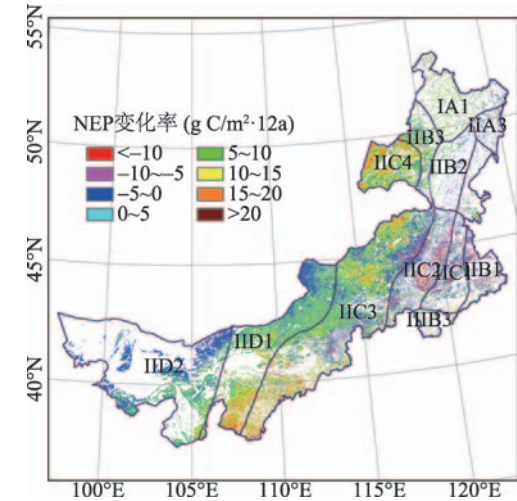


图6 2001-2012年内蒙古草地生态系统NEP平均变化率和时空变化格局

Fig. 6 Spatial and temporal pattern and the average change rate of NEP in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

表5 2001-2012年内蒙古草地生态系统生态地理分区NEP变化趋势
Tab. 5 Trend of NEP in eco-geographical region in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

生态分区	NEP变化率($\text{g C/m}^2\cdot 12\text{a}$)
IA1	2.40
IIA3	-1.75
IIB1	-2.35
IIB2	-0.51
IIB3	3.11
IIC1	-3.50
IIC2	-2.83
IIC3	3.55
IIC4	7.57
IID1	3.35
IID2	2.04
IIB3	1.06

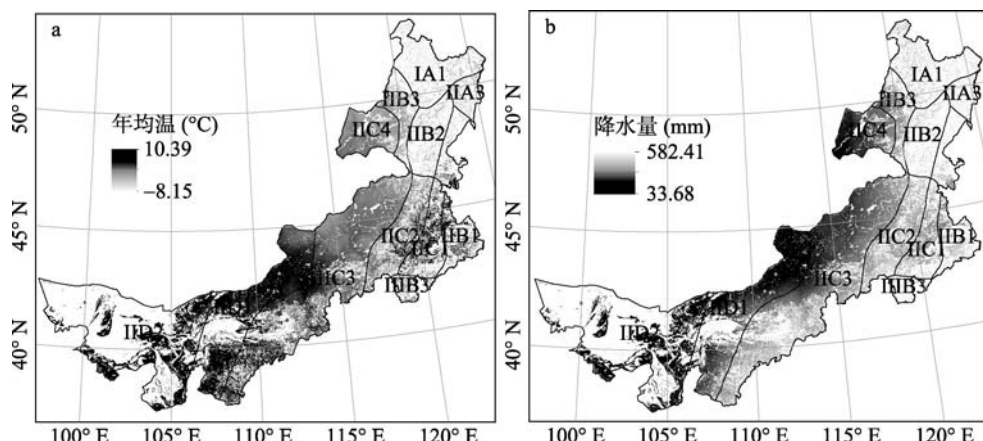


图7 2001-2012年内蒙古草地生态系统年均温空间格局(a)及年降水空间格局(b)

Fig. 7 The spatial pattern of the average annual temperature (a) and the annual precipitation (b) in Inner Mongolia grassland ecosystem from 2001 to 2012

中部典型草原生态区, 主要位于半干旱气候区的IIC1、IIC2、IIC3、IIC4区, 年降水、年均温均呈现西南—东北方向上的梯度变化。具有明显的温带大陆性季风气候特征, 冬季受来自高纬内陆偏北风的影响, 盛行极地大陆气团, 寒冷干燥; 夏季受极地海洋气团等的影响, 盛行东风和东南风, 暖热多雨, 雨热同季, 有利于牧草生长。东北部呼伦贝尔高原年降水量较多、年均温较低, 随经度自东至西推移, 锡林郭勒高原、乌兰察布高原的降水量递减、年均温递增。

西部荒漠生态区, 主要位于干旱气候区的IID1、IID2区, 大部分地区年降水量小于150 mm, 年均温则在7℃以上。具有明显的温带干旱季风气候特征, 冬季受寒冷气团控制, 漫长、严寒、少雪; 夏季多数时间受西风带系统或副热带高压控制, 干旱、少雨。西部荒漠区温度与降水的搭配不协调使得牧草的生长发育受到影响, 引起牧草产量和质量波动, 在一定程度上导致荒漠草原退化。

3.4.2 内蒙古草地NPP与温度、降水的相关关系 分析内蒙古草地生态系统NPP与温度的相关性, 内蒙古草地生态系统大部分地区与温度呈负相关。统计表明, 整个研究区NPP与年均温的平均偏相关系数为-0.117。NPP与年均温呈正相关的草地面积为18.2万km², 占草地总面积的34.92%, 主要分布于IIC3区的锡林郭勒高原南部、IID1区的乌兰察布高原北部地区及IIC1、IIC2区, 说明该地区典型草原NPP随温度升高而增加; NPP与年均温呈负相关的草地面积为33.82万km², 占草地总面积的64.89%, 主要集中于IIB3东北部大兴安岭北段西侧草甸草原区、IIC4呼伦贝尔平原草原区及IIC3、IID1的南部地区, NPP随温度升高而降低。从显著性分布(图8a)可以看出, 大部分草地NPP与温度的显著性并不高, 说明温度并不是内蒙古草地净第一性生产力的主要气候限制因子。

分析内蒙古草地生态系统NPP与降水的相关性, 内蒙古草地生态系统大部分地区与降水呈正相关。统计表明, 整个研究区NPP与年降水的平均偏相关系数为0.53。NPP与年降水呈正相关的草地面积为49.11万km², 占草地总面积的94.24%, 广泛分布于内蒙古典型草原IIC3、IIC4区和荒漠草原IID1、IID2区, 说明降水是影响该地区净第一性生产力的主要气候限制因子之一; NPP与年降水呈负相关的草地面积为3.01万km², 占草地总面积的5.76%, 主要集中于IIB3东北部大兴安岭北段西侧草甸草原区等, 即降水不是草甸草原生产力的主要控制因子。从显著性分布(图8b)可以看出, NPP与降水呈显著正相关的草地主要分布于IIC4呼伦贝尔平原草原区、IID1鄂尔多斯及内蒙古高原西部荒漠

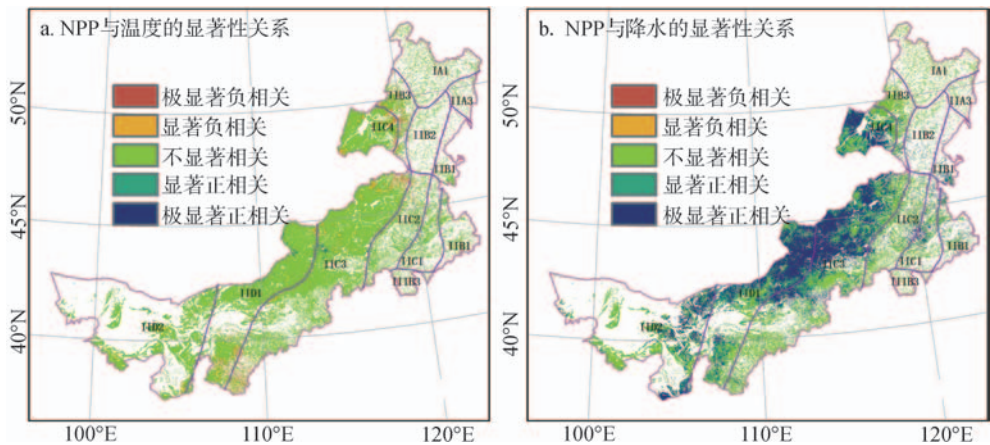


图8 内蒙古草地生态系统NPP与温度(a)及降水(b)的显著性关系

Fig. 8 The significant relationship of NPP with temperature (a) and precipitation (b) in Inner Mongolia grassland ecosystem

草原区。其他地区NPP与降水相关性并不显著，或呈较弱的负相关关系。

3.4.3 内蒙古草地NEP与温度、降水的相关关系 分析内蒙古草地生态系统NEP与温度的相关性，内蒙古草地生态系统大部分地区与温度呈负相关。统计表明，整个研究区NEP与年均温的平均偏相关系数为-0.132。NEP与年均温呈正相关的草地面积为17.84万km²，占草地总面积的34.23%，主要分布于西部荒漠草原区IID1、IID2，该地区NEP随温度升高而增加；NEP与年均温呈负相关的草地面积为34.28 km²，占草地总面积的65.72%，主要集中于IIC4呼伦贝尔平原草原区、IIC3内蒙古东部草原区的北部及IIB3草原区，NEP随温度升高而减少。从显著性分布（图9a）上可以看出，大部分草地NEP与温度的显著性并不明显，说明温度并不是影响内蒙古草地净生态系统生产力的主要气候限制因子。

分析内蒙古草地生态系统NEP与降水的相关性，内蒙古草地生态系统部分地区与降水呈正相关、部分地区呈负相关。统计表明，整个研究区NEP与年降水的平均偏相关系数为0.15。NEP与年降水呈正相关的草地面积为19.38万km²，占草地总面积的37.18%，主要分布于IIC4呼伦贝尔平原草原区及IIC3内蒙古东部草原区；NEP与年降水呈负相关的草地面积为33.82 km²，占草地总面积的64.89%，主要集中于IIB3大兴安岭北段西侧草

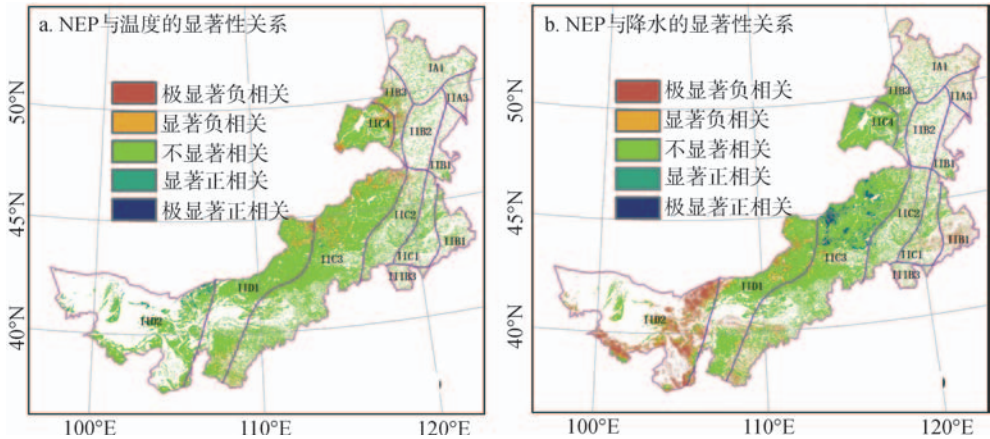


图9 内蒙古草地生态系统NEP与温度(a)及降水(b)的显著性关系

Fig. 9 The significant relationship of NEP with temperature (a) and precipitation (b) in Inner Mongolia grassland ecosystem

原区、IIB1 松辽平原中部草原区及西部荒漠草原区 IID1、IID2, 该区草地 NEP 随降水的增加而减少。从显著性分布 (图 9b) 上可以看出, NEP 与降水呈显著正相关的草地主要分布于 IIC3 锡林郭勒高原; 与降水呈极显著负相关的草地集中分布于 IID2 阿拉善与河西走廊荒漠区; 其他大部分地区 NEP 与降水相关性并不显著。

3.5 验证

利用 NPP 估算模型对内蒙古草原 2011-2012 年间 7、8 月份的 NPP 进行模拟, 估算结果与同期实测地上生物量间呈显著相关关系 (图 10)。实测值总体上小于模拟值, 这主要是由于估算的净第一性生产力, 包括植地上、地下部分所积累的有机物数量, 而实测值只取植物的地上部分。研究区 12 年以来草地 NPP 平均值为 278.83 g C/m^2 , 这与包刚等^[37]利用 MODIS 数据和 CASA 模型, 估算出 2002-2006 近 5 年内蒙古草地平均净初级生产力的结果 (262.05 g C/m^2) 较为一致。通过对比发现, 本文的 NEP 研究结果与陶波等^[38]人采用 CEVSA 模型的研究结果数值范围较为相近, 空间格局较为一致。但关于 NEP 的估算结果仍存在很大的不确定性, 主要是由于 NPP 及土壤呼吸估算的不确定性。NPP 估算的不确定性可随数据精度、模型参数调整及实测值验证的方法进一步改善, 而土壤呼吸是一个极其复杂的过程, 本文虽采用 Bond-Lamberty 和 Thomson 等人用 1000 多组样本建立的土壤呼吸作用模型, 但这些数据很多不是以年为尺度, 很多研究主要按照生长季节土壤呼吸量外推的方法用于获取一年的数据, 结果误差较大, 以上方法限制了的土壤呼吸量准确的估计, 进而使得 NEP 的估算结果存在一定的不确定性。

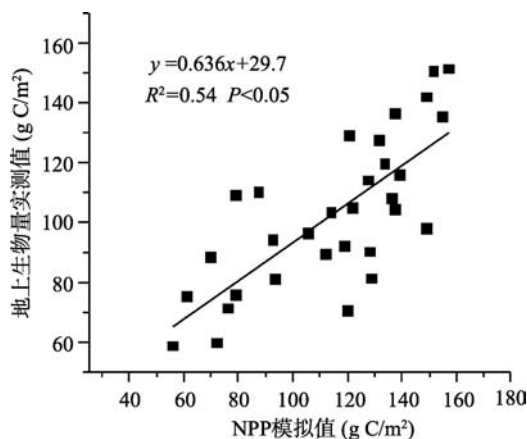


图 10 2011-2012 年地上生物量实测值与 NPP 模拟值的关系

Fig. 10 The relationship between NPP and the observed aboveground biomass in 2011 and 2012

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 2001-2012 年内蒙古草地生态系统 NPP、NEP 总体上呈现由东至西依次递减的空间分布格局。研究区 NPP 平均值为 278.83 g C/m^2 。碳汇区 ($\text{NEP} > 0$) 面积约占草地总面积的 60.28%, 平均累积固碳量为 2186.47 g C/m^2 , 固碳总量约为 0.687 Pg C 。碳源区 ($\text{NEP} < 0$) 面积约占 39.72%, 平均碳排放量为 660.32 g C/m^2 , 整个研究区碳释放总量为 0.137 Pg C ; 整个内蒙古草地生态系统净碳汇总量达到 0.55 Pg C , 年固碳率为 0.046 Pg C/a 。

(2) 从时间序列上看, 2001-2012 年内蒙古草地生态系统的 NPP 与 NEP 均呈增长趋势。整个研究区 NPP 平均值在 $200 \sim 350 \text{ g C/m}^2$ 之间波动, 年增长率为 3.781 g C/m^2 ; NEP 平均值在 $50 \sim 150 \text{ g C/m}^2$ 之间波动, 年增长率为 2.104 g C/m^2 。时间序列上 NPP 与 NEP 的变化趋势并不完全同步。

(3) 从空间变化格局上看, 2001-2012 年内蒙古大部分地区草地 NPP 均呈增长趋势, 呈增长趋势的草地面积占草地总面积的 83.6%; NEP 变化率的空间分布格局与 NPP 的基本一致, NEP 呈增长趋势的草地面积占草地总面积的 70.8%。

(4) 研究区大部分草地 NPP 与降水呈显著的正相关关系, 而与温度呈较弱的负相关关系。影响草地净第一性生产力的主要气候限制因子为降水量, 且合理的水热配置最有

利于牧草的生长。研究区大部分草地 NEP 与降水呈较弱的正相关关系, 而与温度呈较弱的负相关关系, 说明温度和降水并不是影响内蒙古草地碳汇的主要限制因子。

4.2 讨论

(1) NPP 模拟值与实测值虽然有着较强的相关性, 但模拟结果仍有一些较离散, 原因可能有以下几点: 首先, 卫星反演的 NPP 代表了 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 像元上的平均状态, 而实际观测的取样是 1 m^2 ; 其次, 牧草的种类很多, 实际取样有时只代表有限区域的物种, 而卫星观测的区域代表一个混合像元, 这种地表的非均一性在卫星资料应用中是很难克服的; 另外, NPP 包括了地下生物量的累积, 对于不同的作物, 地上生物量和地下生物量并不存在简单的线性关系。

(2) NEP 估算结果存在很大的不确定性, 主要归因于 NPP 估算的不确定性及土壤呼吸估算的不确定性。土壤呼吸是一个非常复杂的生态学过程, 很难准确估算。当前全球和全国范围内, 每年的土壤呼吸观测仍相对较少。

(3) NEP 实际上表示大气 CO_2 进入生态系统的净光合产量。NEP 表示较大尺度上碳的净贮存, 其数值可以是正也可以是负。当 $\text{NEP} < 0$ 时, 表明该生态系统为 CO_2 之汇, 反之则为源。20 世纪 90 年代以后, 该指标广泛应用于全球碳循环研究。但近年来提出的净生物群区生产力 (net biome productivity, NBP) 是指 NEP 中减去各类自然和人为干扰 (如火灾、病虫害、动物啃食、森林间伐以及农林产品收获) 等非生物呼吸消耗 (NR) 所剩下的部分。显然, NBP 是应用于区域或更大尺度的生物生产力的概念, 其数据变化于正负值之间。实际上, NBP 在数值上就是全球变化研究中所使用的陆地碳源/碳汇的概念。因为在 NEP 一定的情况下, NBP 值大小取决于 NR 值, 而 NR 主要是由非生物因素决定的^[39]。因此, 今后本研究将把非生物因素考虑在内, 综合探讨区域的 NBP。

(4) 文中仅分析了 NPP、NEP 与温度、降水的相关性, 并未探讨与土壤异养呼吸等的关系。影响 NPP、NEP 时空变化格局的不仅有温度、降水这两个气象因子, 还包括太阳辐射、蒸发量、大气中 CO_2 浓度等自然因子及放牧、围栏等人为因子。本研究将在 NPP、NEP 变化机理上有所改进。

参考文献(References)

- [1] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.
- [2] Mansanet-Bataller M, Pardo Á. What you should know about carbon markets. *Energies*, 2008, 1(3): 120-153.
- [3] Su Yongzhong, Zhao Halin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228. [苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.]
- [4] Houghton J T, Ding Y. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [5] Zhan J Y, Yan H M, Chen B, et al. Decomposition analysis of the mechanism behind the spatial and temporal patterns of changes in carbon bio-sequestration in China. *Energies*, 2012, 5(2): 386-398.
- [6] Battle M, Bender M L, Tans P P et al. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O_2 and $\delta^{13}\text{C}$. *Science*, 2000, 287(5462): 2467-2470.
- [7] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [8] Sarmiento J L, Gloor M, Gruber N, et al. Trends and regional distributions of land and ocean carbon sinks. *Biogeosciences*, 2010, 7(8): 2351-2367.
- [9] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, et al. Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3036-3047.
- [10] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.

- [11] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [12] Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Jia Liangqing, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1101-1110. [赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.]
- [13] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L et al. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present. *Nature*, 1990, 348(6303): 711-714.
- [14] Scurlock J M O. The global carbon sink: A grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [15] Sun Honglie. *Ecosystems of China*. Beijing: Science Press, 2005. [孙洪烈. *中国生态系统*. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [16] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau. *Ecology*, 2008, 89(8): 2140-2153.
- [17] Steffen W L, Walker B H, Ingram J S L, et al. *Global change and terrestrial ecosystems: The Operational Plan*. Stockholm, Sweden: Global Change Report. No.21, 1992.
- [18] Woodwell G M, Whitaker R H. The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [19] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [20] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [21] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, et al. Ecosystem carbon storage in Arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 2004, 431(7007): 440-443.
- [22] Zhang L, Guo H D, Jia G S, et al. Net ecosystem productivity of temperate grasslands in northern China: An upscaling study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 71-81.
- [23] Bai Y F, Han X G, Wu J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184.
- [24] Niu Jianming. Impacts prediction of climatic change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(4): 277-282. [牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影响的预测研究. *草地学报*, 2001, 9(4): 277-282.]
- [25] Zhang Qingyu, Zhao Dongsheng, Wu Shaohong, et al. Research on vegetation changes and influence factors based on eco-geographical regions of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 594-601. [张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 等. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. *地理科学*, 2013, 33(5): 594-601.]
- [26] Liu Zhihong, McVicar T R, Li Lingtao. Interpolation for time series of meteorological variables using ANUSPLIN. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2008, 36(10): 227-234. [刘志红, McVicar T R, Li Lingtao. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(10): 227-234.]
- [27] Fang J, Tang Y, Lin J, et al. *Global ecology: Climate Change and Ecological Responses*. Beijing: Higher Education Press, 2000. [方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. *全球生态学: 气候变化与生态响应*. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- [28] Prince S D. Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995: 815-835.
- [29] Del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology*, 2008, 89(8): 2117-2126.
- [30] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239-255.
- [31] Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 296-300. [朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.]
- [32] Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424. [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. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [33] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [34] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [35] Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. The spatio-temporal changes of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798-7806. [袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010 年

- 黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.]
- [36] Mu Shaojie, Li Jianlong, Zhou Wei, et al. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3752-3764. [穆少杰, 李建龙, 周伟, 等. 2001-2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.]
- [37] Bao Gang, Bao Yuhai, ALateng Tuya, et al. Estimation of vegetation net primary productivity using MODIS data and CASA model in Inner Mongolia. The National Agricultural Remote Sensing Technology Conference, 2009: 247-256. [包刚, 包玉海, 阿拉腾图雅, 等. 用 MODIS 数据和 CASA 模型估算近五年内蒙古植被净初级生产力. 全国农业遥感技术研讨会论文集, 2009: 247-256.]
- [38] Tao Bo, Cao Mingkui, Li Kerang, et al. Spatial pattern and its change of Chinese terrestrial net ecosystem productivity from 1981 to 2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(12): 1131-1139. [陶波, 曹明奎, 李克让, 等. 1981-2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(12): 1131-1139.]
- [39] Fang Jingyun, Ke Jinhui, Tang Zhiyao, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(4): 414-419. [方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.]

Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem

DAI Erfu^{1,2}, HUANG Yu³, WU Zhuo^{1,2,4}, ZHAO Dongsheng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, CAS, Beijing 100101, China;

3. School of Planning, Faculty of Environment, University of Waterloo, Waterloo ON N2L 3G1, Canada;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, field sampling data, remote sensing data, and ground meteorological observation data were used to estimate the net primary productivity (NPP) in the grassland ecosystem in Inner Mongolia from 2001 to 2012 based on a light use efficiency model. The spatiotemporal distribution of the NEP in the Inner Mongolia grassland ecosystem was then analyzed by estimation of the NPP and soil respiration from 2001 to 2012. This paper also investigated the response of the NPP and NEP to main climatic variables on the spatial and temporal scales from 2001 to 2012. Results showed that most of the grassland area in Inner Mongolia has functioned as a carbon sink since 2001 and that the annual carbon sequestration rate amounts to $0.046 \text{ Pg C} \cdot \text{yr}^{-1}$. The total net carbon sink of the Inner Mongolia grassland ecosystem over the 12-year period reached 0.557 Pg C . The carbon sink area accounted for 60.28% of the total grassland area and sequestered 0.692 Pg C , whereas the C source area accounted for 39.72% of the total grassland area and released 0.135 Pg C . The NPP and NEP of the Inner Mongolia grassland ecosystem have more significant correlations with precipitation than with temperature, and the Inner Mongolia grassland ecosystem has great potential for carbon sequestration.

Keywords: grassland ecosystem; NPP; NEP; carbon source-sink; Inner Mongolia