

# 内蒙古生态屏障区固碳服务效应分析

刘婧雅<sup>1,2</sup>, 秦克玉<sup>1,2\*</sup>, 董战峰<sup>3</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2. 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100190

3. 生态环境部环境规划院, 生态环境管理与政策研究所, 北京 100012

**摘要** 内蒙古自治区是中国北方重要的生态安全屏障, 其生态系统具有很强的固碳能力, 然而其固碳效应对区域的影响尚不清晰。采用 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型计算的净初级生产力 (net primary production, NPP) 推算植被部分的固碳服务供给量, 使用上层土壤的有机碳含量作为每年土壤固碳服务的供给量, 从碳排放的角度衡量固碳需求的空间分布, 分析内蒙古生态屏障区固碳服务的供需平衡状况。在此基础上, 通过计算碳汇 (固碳服务供给量) 和碳源 (固碳服务需求量) 的差值, 基于 ArcGIS 对固碳服务的空间格局及其流动比率进行空间分析, 揭示固碳服务效应。结果表明, 研究区固碳服务在总体上供大于求, 但在空间分布上具有显著差异。省会城市及各地级市周边普遍表现为供小于求, 为需求型区域, 是内蒙古固碳服务的潜在受益区范围。其中省会城市的需求程度尤为明显。内蒙古固碳服务流动的实际受益区范围涉及京津冀城市群、山西省、辽宁省、宁夏回族自治区、陕西省榆林市、甘肃省张掖市、金昌市、武威市、白银市。内蒙古作为生态屏障区, 其固碳服务对周边地区碳汇效应显著。

**关键词** 内蒙古生态屏障; 固碳服务; 供需平衡; 流动效应

内蒙古自治区位于中国北部, 与黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、宁夏和甘肃等省毗邻, 临近京津冀都市圈, 是中国重要的生态屏障<sup>[1-3]</sup>。近年来, 内蒙古通过实施三北防护林建设<sup>[4]</sup>、天然林保护<sup>[5]</sup>、草原湿地恢复等一系列生态环境保护工程, 以人工造林、封山育林、退牧还草、飞播绿化等方式治理水土流失和改善生态环境<sup>[6]</sup>, 初步形成了乔灌木、

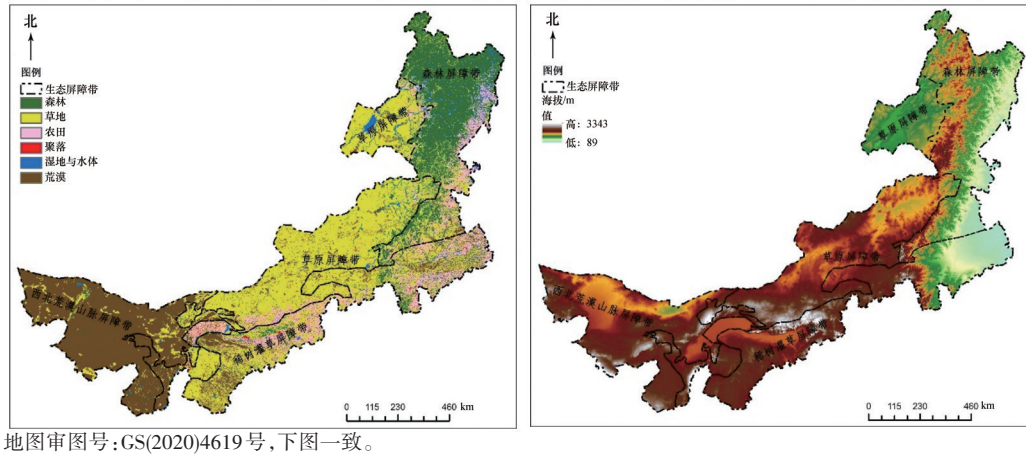
点线面、带网片相结合的区域性防护体系 (图 1)。据 2023 年公布的内蒙古第六次荒漠化和沙化土地监测结果显示, 截至 2022 年, 内蒙古荒漠化和沙化土地面积分别比 2014 年减少 2415 万亩、1459 万亩, 减少面积均居全国首位, 天然草原和林网生态逐步好转, 横跨中国三北的生态屏障正在逐步建成<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2023-07-29; 修回日期: 2024-03-18

作者简介: 刘婧雅, 博士后, 研究方向为生态系统服务, 电子邮箱: liujy.17b@igsnr.ac.cn; 秦克玉 (通信作者), 助理研究员, 研究方向为生态系统网络观测与模拟, 电子邮箱: qinkeyu@igsnr.ac.cn

引用格式: 刘婧雅, 秦克玉, 董战峰. 内蒙古生态屏障区固碳服务效应分析[J]. 科技导报, 2024, 42(7): 84-92;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.01297



地图审图号:GS(2020)4619号,下图一致。

图1 内蒙古不同生态安全屏障带土地覆被和高程

生态系统固碳服务通过捕获大气中的碳并把捕获到的碳固定起来<sup>[8]</sup>,抵消人类向大气中排放的一部分二氧化碳<sup>[9]</sup>,从而起到调节气候的作用,是生态系统调节服务的重要组成部分<sup>[10-11]</sup>。从物理学中“场”的角度来看,固碳服务的空间分布在数量和方向上均存在差异,相当于一个矢量场,导致区域的固碳服务势能也有所差异,在这一势能的驱使下,区域内部以及区域与环境之间会产生固碳服务在空间上的流动,表现为从碳汇区域(本地固碳量>释放量)向碳源区域(本地固碳量<释放量)流动。固碳服务属于调节服务,虽然该服务的流动效应是全球的,但是其调节功能对临近区域的影响更为直接、明显<sup>[12]</sup>。

针对生态系统固碳服务,在研究方法方面,生态系统服务供给评估已经形成一套较为成熟的评价体系,能够较好模拟固碳服务物质量和价值量的生态模型与统计模型被广泛应用<sup>[12]</sup>。但限于生态系统服务流概念的不确定性和新颖性,当前对于生态系统固碳服务流概念的理解与认知仍未达成统一<sup>[13]</sup>。生态系统服务流研究对风域、水域生态系统提供的调节服务关注较多,对于非实体交易性的生态系统服务,如固碳等生态系统服务的适用性还有待继续探索。

内蒙古自治区自然生态系统具有很强的固碳能力,其固碳服务除了满足自身的碳排放需求以外,对周边临近地区的固碳也具有一定影响,但尚无研究对固碳服务的区域效应进行分析。本研究

选取中国境内与内蒙古自治区相邻近的10个省(市、自治区):北京市、天津市、河北省、黑龙江省、吉林省、辽宁省、山西省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区为研究对象,分析内蒙古固碳服务的区域流动效应,目的是认识到内蒙古生态安全屏障重要性及其维持与改善区域生态安全的作用,厘清内蒙古生态环境存在主要问题,尊重自然规律,提出保护现有生态系统以及提升生态系统质量的政策措施,确保内蒙古生态安全屏障功能得到充分发挥。

## 1 固碳服务的供需分布格局计算

### 1.1 固碳服务需求的时空分布模型

从碳排放的角度衡量固碳需求的时空分布。碳排放的测算方法主要有实测法<sup>[14]</sup>、物料衡算法和排放系数法<sup>[15]</sup>,其中排放系数法是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的、适用于多尺度的碳排放估算方法<sup>[16]</sup>,但单纯的碳排放测算难以体现碳排放的空间差异。为了更加直观地表现区域固碳服务需求的时空分布,本研究基于能源统计中人均碳排放数据和人口密度分布计算区域碳源的空间分布<sup>[17]</sup>。

$$C_e = \sum_{x=1}^X \rho(x) \cdot \varphi(x) \quad (1)$$

式中, $C_e$ 为人类社会经济活动中的碳排放量,即固碳服务的需求量; $\rho(x)$ 为像元 $x$ 的人口密度; $\varphi(x)$ 为像元 $x$ 的人均碳排放; $X$ 表示研究区的像元总数。

2010、2015年人口密度空间分布数据来自资源环境数据中心,人均碳排放量参考文献[18]的省市尺度研究结果(表1)。

表1 2010年研究区人均碳排放量 (tC·人<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>)

研究区	碳排放量	研究区	碳排放量
北京	2.57	山西	3.53
天津	3.60	陕西	1.88
河北	2.75	甘肃	1.78
黑龙江	1.92	宁夏	5.42
吉林	2.22	内蒙古	5.55
辽宁	3.57		

## 1.2 固碳服务供给的空间分布模型

固碳服务的供给包括植被固碳和土壤固碳2部分<sup>[17]</sup>。考虑到估算的复杂度与精度、所需数据的可获取性及研究区的实际情况,本研究选用Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型计算的净初级生产力(net primary production, NPP)推算植被部分的固碳服务供给量<sup>[19-20]</sup>。土壤固碳服务与土壤有机碳密切相关<sup>[21-22]</sup>,土壤有机碳库一般包括3个可识别的亚碳库:“活动”碳库(根分泌物和快速分解的新鲜植物碎片)、“缓慢”碳库(更新时间变化于数年至数百年间)、“稳定”碳库(驻留于土壤中长达几千年的稳定有机质)。“活动”碳库和“缓慢”碳库多位于表层土壤,是土壤固碳服务的主要组成。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)与维也纳国际应用系统研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)构建的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)将土壤分为上层(0~30 cm)和下层(30~100 cm)。由于土壤有机碳库更新速率的复杂性和不确定性较大<sup>[23]</sup>,且深层土壤碳库相对稳定,在单年份的时间尺度内固碳效果不明显,本研究使用上层土壤的有机碳含量作为每年土壤固碳服务的供给量。由此得生态系统固碳总量的计算公式如下:

$$C_s = \sum_{x=1}^X [C_{s_{veg}}(x) + C_{s_{soil}}(x)] = \sum_{x=1}^X [C_{s_{veg}}(x) + \rho(x_{top}) \cdot S(x) \cdot h(x_{top}) \cdot OC(x_{top})] \quad (2)$$

式中, $C_s$ 为生态系统固碳总量,即固碳服务的供给量; $C_{s_{veg}}(x)$ 、 $C_{s_{soil}}(x)$ 分别为像元 $x$ 的植被固碳量和土壤固碳量, $\rho(x_{top})$ 为像元 $x$ 上对应土壤类型上层的土壤容重, $S(x)$ 为像元 $x$ 上的土壤面积, $h(x_{top})$ 为像元 $x$ 上对应土壤类型的上层深度, $OC(x_{top})$ 为像元 $x$ 上对应土壤类型的土壤上层有机碳含量(%)。

## 1.3 固碳服务的空间流动模型

区域的碳源和碳汇受到来自自然生态和社会经济等多方面的影响,2者之间的平衡数量关系也比较复杂。通过计算供需平衡量,即碳汇(固碳服务供给量)和碳源(固碳服务需求量)的差值,以表征同一区域中碳汇与碳源平衡的数量关系,其计算公式为:

$$B_x = C_{s_x} - C_{e_x} \quad (3)$$

式中, $B_x$ 为像元 $x$ 上固碳服务的供需平衡量, $C_{s_x}$ 为同一时段像元 $x$ 的碳吸收量,即固碳服务供给量; $C_{e_x}$ 为像元 $x$ 某时段的碳排放量,即固碳服务需求量。

$B_x$ 能够表达区域固碳服务的自给率, $B_x$ 越大,区域的固碳服务自给率越强,反之越弱。当 $B_x > 0$ ,表明区域碳供给倾向大于碳需求倾向,即为供给型区域;当 $B_x < 0$ ,表明区域碳需求倾向大于碳供给倾向,即为需求型区域。基于ArcGIS对固碳服务的空间格局及其流动比率进行空间分析,可绘制区域固碳服务空间流动的方向和趋势。

## 1.4 数据来源

研究选用的数据源主要包括遥感数据、地理基础数据、气象数据、土地利用专题地图和世界土壤数据库。其中,遥感数据为2010年250 m空间分辨率的MODIS数据产品。地理基础数据包括数字高程模型(DEM)、坡度、坡向、土壤类型等。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,包括年平均降水、年平均气温、7月平均气温、地表太阳辐射等。世界土壤数据库为本文提供中国1:100万土壤有机碳含量分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 固碳服务供给的空间分布

从空间分布看,植被固碳服务供给量的高值区域主要位于东北部的小兴安岭、长白山、陕西南部的秦岭山地(图2(a))。土壤固碳服务的高值区域主要位于东北地区、内蒙古东北部的大兴安岭、呼

伦贝尔草原、锡林郭勒草原、内蒙古中部的大青山地区、甘肃的祁连山一带(图2(b))。从整体上看,研究区内当年植被固碳量要高于土壤固碳量,固碳服务供给总量的空间分布格局与植被固碳量基本一致,高值区也主要位于东北部的小兴安岭、长白山、陕西南部的秦岭山地。

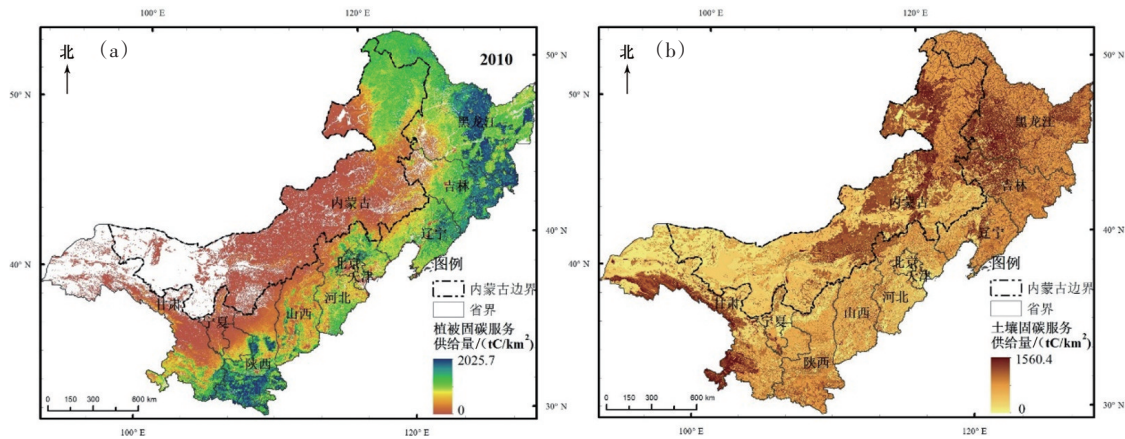


图2 2010年研究区植被土壤固碳服务供给量的空间分布

2010年,研究区涉及省市固碳总量为977.13 Tg( $1 \text{ Tg}=10^{12} \text{ g}$ ),其中土壤固碳为119.36 Tg,占固碳总量的12.22%、植被固碳857.77 Tg,占固碳总量的87.78%。基于固碳服务的空间分布,得到不同省市的固碳服务供给量。其中黑龙江省的固碳总量最高,达到285.15 Tg,占整个研究区固碳总量的29.18%,其91.59%的固碳量均来自于植被固碳,这与黑龙江境内分布众多北方林区有关,北方森林固碳是陆地生态系统碳库的重要组成部分<sup>[24]</sup>。其次为内蒙古,固碳总量达180.50 Tg,其中75.99%来自于植被固碳,这与内蒙古东北部大兴安岭广袤的森林以及中部地区广阔的温带草原密切相关。此外,内蒙古土壤碳库在研究区各省市中最高,为43.33 Tg,为内蒙古固碳释氧服务的流动提供了条件。

这种空间分布格局和省份间的差异与不同土地利用方式的固碳能力有关。土地利用方式是人类社会活动作用于自然环境和气候变化的重要介质,不同的土地利用方式具有不同的植被固碳能力和土壤固碳能力。对不同土地利用类型的固碳服务供给量进行统计发现(图3),在土壤固碳中,单

位面积土壤固碳能力最高的土地利用类型为湿地和水体,达到 $46.35 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其次为耕地、林地、草地。土壤固碳总量最高的土地利用类型为草地,为37.08 Tg,占整个研究区土壤固碳总量的31.07%,其次为耕地、林地,分别占土壤固碳总量的27.80%、24.61%。在植被固碳中,单位面积植被固碳能力最高的土地利用类型为林地,高达 $655.74 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其次为耕地、湿地和水体、草地。植被固碳总量最高的土地利用类型为林地,高达440.69 Tg,占整个研究区植被固碳总量的51.37%,其次为耕地和草地,分别占植被固碳总量的28.64%、19.69%。在固碳总量上,林地的固碳总量占比最高,达到48.10%,其次为耕地(28.64%)和草地(19.69%)。因此,林地、草地、耕地是研究区内主要的碳汇区域,而城镇建设用地、裸地和荒漠的单位面积固碳能力较低,对固碳服务供给的贡献较小。

鉴于林地、草地、耕地是研究区内主要的碳汇区域,对研究区各省市的以上土地利用类型进行固碳服务供给量的统计(图4),以进一步识别碳汇的高值区域,为相应生态系统的保护提供依据。林

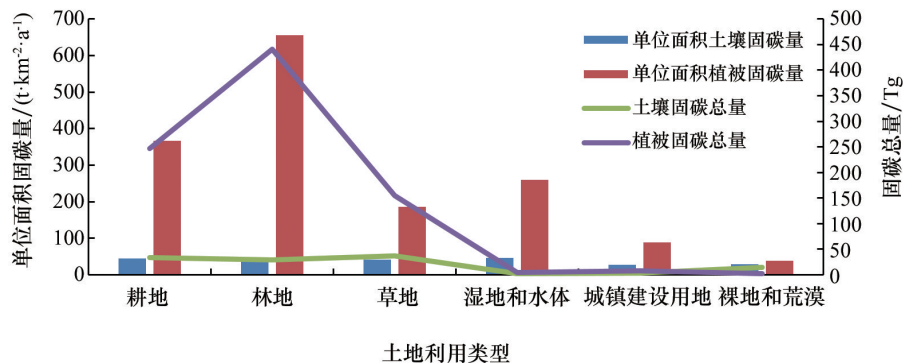


图3 2010年研究区不同土地利用类型的固碳服务供给量统计

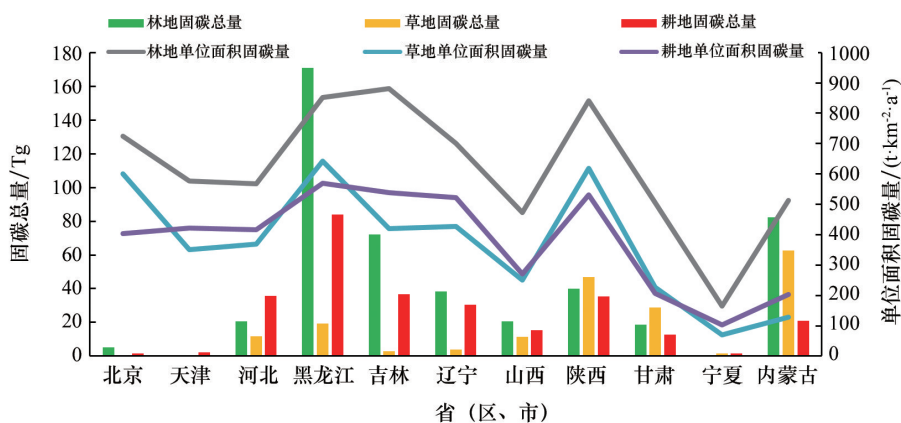


图4 2010年研究区各省(区、市)主要碳汇土地利用类型的固碳服务供给量统计

地、草地、耕地固碳总量的最高值分别位于黑龙江、内蒙古、黑龙江,2010年固碳总量分别达到170.92、62.54、84.05 Tg。林地、草地、耕地单位面积固碳总量最高的省份分别为吉林、黑龙江、黑龙江,为880.88、643.01、568.70  $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 。进一步说明北方森林和温带草原的固碳能力较高。

## 2.2 固碳服务需求的空间分布

2010年研究区的人口总数为 $3.33 \times 10^8$ 人,占当年中国总人口数的25.64%,平均人口密度分别为 $112 \text{人} \cdot km^{-2}$ 。在空间分布上,人口密度的高值区主要位于京津冀地区和其余省会城市及其周边地区。基于人口密度和人均碳排放量计算固碳服务需求的分布(图5)。与人口密度的空间分布格局相似,固碳服务需求的高值区主要研究区经济发展水平较高、人口分布较多的区域,包括京津冀地区和其余省会城市及其周边地区。同时人口主要分布在城镇建设用地,因此城镇建设用地的单位面积碳排放量最高,2010年高达 $1242.36 \text{t} \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ ,

成为研究区的主要碳源。其次为耕地( $695.12 \text{t} \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )、水体和湿地( $558.46 \text{t} \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ ),林地、草地、荒漠和裸地的单位面积碳排放量较低,分别为

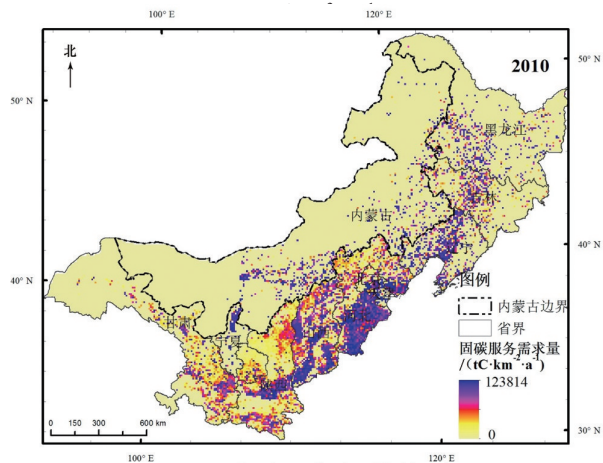


图5 2010年研究区固碳服务需求的分布

从不同省市看,2010年天津市的平均碳排放量最高,为 $3956.53 \text{tC} \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ ,河北省的固碳服务需求总量最高,为 $20.97 \times 10^5 \text{t}$ ,占研究区固碳服务

需求总量的 22.52%, 此外作为能源输出大省的辽宁、内蒙古、山西的固碳服务需求量相对较高(表 2)。

表 2 2010 年研究区涉及省市的固碳服务需求量统计

研究区	平均碳排放量/ ( $tC \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	固碳服务需求 总量/ $10^5 t$
北京	1339.69	2.16
天津	3956.53	4.39
河北	1165.04	20.97
黑龙江	160.31	6.91
吉林	307.13	5.63
辽宁	1016.43	14.03
山西	792.55	11.90
陕西	327.96	6.48
甘肃	125.98	5.05
宁夏	595.99	2.97
内蒙古	116.43	12.62
总计	327.60	93.10

### 2.3 固碳服务受益区识别及流动效应的空间分布格局

研究区固碳服务在总体上供大于求,但在空间分布上具有显著差异(图 6)。省会城市及各地级市周边普遍表现为  $B_s < 0$ , 为需求型区域,是内蒙古固碳服务的潜在受益区范围。其中省会城市的需求程度尤为明显,即省会城市周边固碳服务供需平衡量表现为明显的大面积负值区域。而东北部小兴安岭、长白山,内蒙古境内的大兴安岭、呼伦贝尔

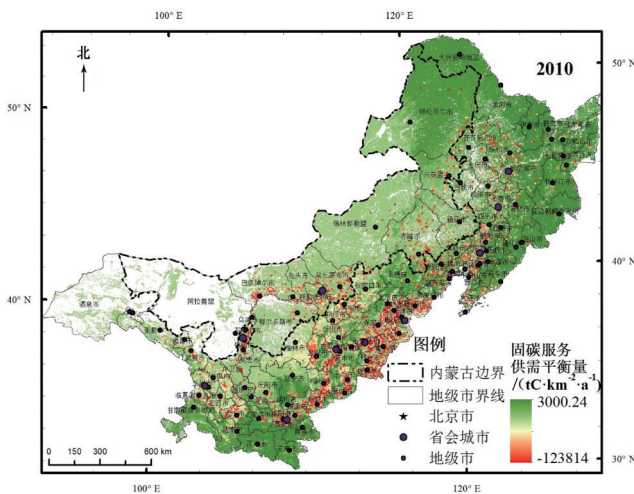


图 6 2010 年研究区固碳服务供需平衡量的空间分布

草原、锡林郭勒草原,京津冀北部生态涵养区,山东西部太行山、西部吕梁山一带,陕西南部秦岭一带,宁夏南部山地、甘肃东南部陇中高原  $B_s > 0$ , 是主要的碳汇中心,为供给型区域。

对研究区涉及省市的固碳服务供需平衡量进行统计分析,从省域和地级市 2 个尺度明确内蒙古固碳服务的实际受益区范围。从省域尺度看,黑龙江、内蒙古、吉林、陕西、甘肃的固碳服务供需平衡量为正值,且供需平衡量值依次减低,分别为 216.57、63.14、60.80、59.49、10.73 Tg, 即在各省内固碳服务总体上供大于求。从地级市尺度看,以上省份与内蒙古接壤部分的供需平衡量还存在负值区域,但并不是所有包括吉林省白城市,陕西省榆林市,甘肃省张掖市、金昌市、武威市、白银市,因此除以上地级市以外其他地区不属于内蒙古固碳服务的需求范围。河北、山西、辽宁、天津、宁夏、北京的固碳服务供需平衡量为负值,供需平衡缺口分别为 125.23、68.07、56.26、32.38、23.12、12.53 Tg,属于内蒙古固碳服务的实际受益区。因此,内蒙古固碳服务流动的实际受益区范围涉及京津冀城市群、山西省、辽宁省、宁夏回族自治区、陕西省榆林市、甘肃省张掖市、金昌市、武威市、白银市。

供需平衡量的空间差异为固碳服务流动势能存在的原因,即固碳释氧服务由供需平衡量的正值区域向邻近的负值区域流动,直至满足受益区内的固碳服务需求量,抵消供需平衡缺口。由此得到内蒙古固碳服务的空间流动(图 7),在整体上主要表现为:(1) 在呼伦贝尔草原和大兴安岭北端,固碳服务向内蒙古与东北地区交界处的白城市流动;(2) 在大兴安岭南段,固碳服务向辽宁西部的城市群流动;(3) 在锡林郭勒草原,固碳服务向京津冀城市群流动;(4) 在内蒙古中部大青山地区,固碳服务向京津冀城市群和山西中部以太原为中心的城市群流动;(5) 内蒙古鄂尔多斯高原地区,固碳服务向银川平原引黄灌区流动和陕西省榆林市流动;(6) 内蒙古阿拉善高原地区,固碳服务向甘肃省张掖市、金昌市、武威市、白银市流动;(7) 同样在内蒙古内部也存在区域内的固碳服务流动,主要表现为由呼伦贝尔草原向西南部存在供需平衡缺

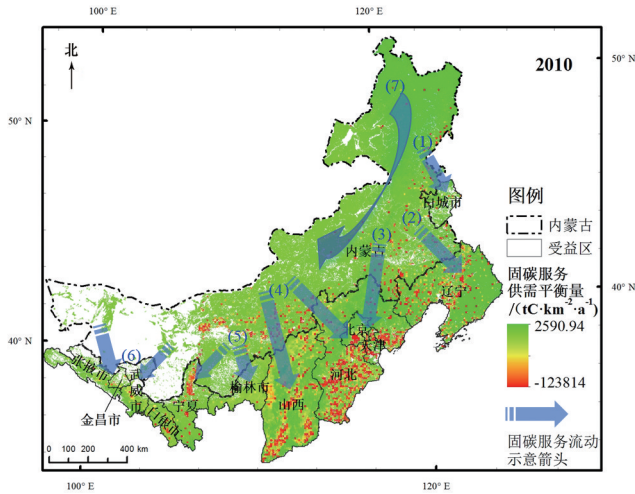


图7 2010年内蒙古生态系统固碳服务的空间流动示意

口的地区流动,以满足区域内部固碳供需平衡缺口,同时累积的固碳服务流动量可以继续向邻近需求省市流动。

### 3 讨论

内蒙古生态屏障区固碳服务对邻近省份碳排放需求的平衡具有重要作用,也是重要的生态安全屏障之一。然而,目前关于固碳服务空间流动尚没有成熟的理论和方法,实质性研究成果较少。本研究尝试耦合多个模型模拟研究区生态系统固碳服务流动,但是多个模型的耦合带来了一定的不确定性:(1)在固碳服务供给的估算部分,研究利用HWSD土壤数据库表层土壤的有机碳含量高,该土壤数据来自全国第二次土壤普查,与现有的实际数据可能存在一定的偏差。(2)基于人口密度分布和人均碳排放量估算固碳服务供给,没有考虑省域内部人均碳排放量的空间分布差异。(3)受先验知识、可获取数据和研究水平的限制,本研究只考虑与内蒙古临近10个省份的固碳服务流动,没有讨论临近国家的固碳服务流动,可能弱化了内蒙古固碳流动的区域效应。在未来研究中,我们将把区域和临近国家的固碳服务流动纳入研究范畴,力争更加全面和系统地分析区域的固碳服务空间流动效应。(4)生态系统服务流动的研究不应局限于单种

生态系统服务,不同生态系统服务流动之间的时空耦合与权衡/协同关系是该领域未来重要的研究发展方向。

### 4 结论

本研究选取中国境内与内蒙古自治区相邻近的10个省市为研究区,从内蒙古固碳服务的空间流动效应角度分析内蒙古固碳服务的区域效应。内蒙古生态系统固碳服务供给高值区域主要位于东北部和陕西南部的秦岭山地。土壤固碳服务的高值区域主要位于东北地区、内蒙古东北部和中部及甘肃的祁连山一带。2010年,研究区涉及省市固碳总量为977.13 Tg,其中土壤固碳为119.36 Tg,植被固碳857.77 Tg。京津冀地区和其余省会城市及其周边地区碳排放量高,固碳服务需求程度较高。内蒙古内部固碳服务流动主要表现为由呼伦贝尔草原向西南部地区流动,以满足区域内部固碳供需平衡缺口。内蒙古固碳服务的实际受益区范围涉及京津冀城市群、山西省、辽宁省、宁夏回族自治区、陕西省榆林市、甘肃省张掖市、金昌市、武威市、白银市。从生态系统服务流的角度较全面地评估了内蒙古生态屏障固碳服务区域效应,结果能够为国家“双碳”战略和开展气候变化相关的生态系统管理提供科学参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古1990—2018年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244–250.
- [2] 王燕, 高吉喜, 金宇, 等. 基于2005—2015年土地利用变化和InVEST模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 654–662.
- [3] 常虹, 翟琇, 石磊, 等. 基于土地利用的内蒙古牧区生态系统服务时空变化(2000—2015)[J]. 草地学报, 2021, 29(3): 583–592.
- [4] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. 生态学报, 2019, 39

- (16): 5847-5856.
- [5] 庞勇, 蒙诗栋, 史锴源, 等. 中国天然林保护工程区森林覆盖遥感监测[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5080-5092.
- [6] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1096-1110.
- [7] 刘俊壕, 周海盛, 郭群. 中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 204-213.
- [8] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106939.
- [9] Zhao Y Y, Liu Z F, Wu J G. Grassland ecosystem services: A systematic review of research advances and future directions[J]. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 793-814.
- [10] 余玉洋, 李晶, 曾莉. 中国南北过渡带生态系统固碳服务及价值量空间格局[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 11-20.
- [11] Yang Y Y, Zheng H, Kong L Q, et al. Mapping ecosystem services bundles to detect high-and low-value ecosystem services areas for land use management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 11-17.
- [12] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571.
- [13] 百晓莹, 向洪莉, 王昕, 等. 长江流域固碳服务流动路径量化及驱动因子分析[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(5): 654-667.
- [14] 刘鹏振, 张力元, 董会忠. 京津冀及周边“2+26”城市碳排放强度时空演变规律及影响因素分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 772-776, 810.
- [15] 王英, 杨娟, 王佳丽. 农田生态系统碳排放时空格局及趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 89-101.
- [16] 王悦, 李锋, 孙晓. 城市家庭消费碳排放研究进展[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1201-1212.
- [17] 李婷. 关中—天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [18] 丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(4): 19-26.
- [19] Qin K Y, Li J, Liu J Y, et al. Setting conservation priorities based on ecosystem services—A case study of the Guanzhong-Tianshui economic region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 3062-3074.
- [20] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的CASA模型NPP遥感估算及分析——以河西走廊为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [21] 张丽, 夏炎, 陈琪, 等. 基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(3): 345-355.
- [22] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355-1366.
- [23] 陈心桐, 徐天乐, 李雪静, 等. 中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1133-1140.
- [24] 陶贞, 沈承德, 易惟熙, 等. 土壤碳动力学同位素示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2004(5): 793-801.

## Analysis of carbon sequestration service effects in Inner Mongolia ecological barrier zone

LIU Jingya<sup>1,2</sup>, QIN Keyu<sup>1,2\*</sup>, DONG Zhanfeng<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. School of Resources and Environmental Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Institute of Ecological Environment Management and Policy Research, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

**Abstract** Supply of carbon sequestration of vegetation is estimated using the CASA model calculating NPP (net primary productivity). The organic carbon content of the upper soil is used as the annual supply of soil carbon sequestration services. The spatial distribution of carbon sequestration demand is measured from the perspective of carbon emissions. The supply–demand balance of carbon sequestration in the ecological barrier area of Inner Mongolia is analyzed. Based on this, the spatial pattern and flow rate of carbon sequestration are analyzed using ArcGIS by calculating the difference between carbon sinks (supply of carbon sequestration services) and carbon sources (demand for carbon sequestration services) to reveal the effectiveness of carbon sequestration services. The results show that carbon sequestration services in the study area are generally in excess of demand but exhibit significant spatial differences. Provincial capital cities and surrounding prefecture–level cities generally show a  $B_s < 0$  pattern, indicating demand–driven regions and potential beneficiary areas of carbon sequestration in Inner Mongolia. The degree of demand is particularly evident in provincial capital cities. The actual benefit areas of carbon sequestration services in Inner Mongolia include the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration, Shanxi Province, Liaoning Province, Ningxia Hui Autonomous Region, Yulin City in Shaanxi Province, Zhangye City, Jinchang City, Wuwei City, and Baiyin City in Gansu Province. As an ecological barrier area, Inner Mongolia’s carbon sequestration services have a significant carbon sink effect on the surrounding regions.

**Keywords** Inner Mongolia ecological barrier zone; carbon sequestration; supply–demand balance; flow effect ●



(责任编辑 徐丽娇)