

DOI: 10.20103/j.stxb.202304020647

张海燕, 樊江文, 黄麟, 李愈哲, 曹巍, 刘爱军, 杨勇, 张雅娴, 常书娟, 王穗子, 任传涛, 李佳慧, 朱炳淑, 王宗, 张金钰. 近 20 年北方草原生态价值核算及其时空差异特征. 生态学报, 2024, 44(6): 2337-2350.

Zhang H Y, Fan J W, Huang L, Li Y Z, Cao W, Liu A J, Yang Y, Zhang Y X, Chang S J, Wang S Z, Ren C T, Li J H, Zhu B S, Wang Z, Zhang J Y. Spatiotemporal variation characteristics of grassland ecosystem values and their differences in northern China from 2000 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2337-2350.

近 20 年北方草原生态价值核算及其时空差异特征

张海燕¹, 樊江文¹, 黄麟¹, 李愈哲¹, 曹巍¹, 刘爱军², 杨勇^{2,*}, 张雅娴³, 常书娟², 王穗子¹, 任传涛⁴, 李佳慧¹, 朱炳淑¹, 王宗⁵, 张金钰⁵

1 中国科学院地理科学与资源研究所自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100101

2 内蒙古自治区林业和草原监测规划院, 呼和浩特 010020

3 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

4 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 牡丹江 157000

5 北京林业大学, 北京 100083

摘要:草原是我国重要的陆地生态系统和自然资源, 具有多元生态服务, 探索草原生态价值核算方法对于草原保护修复与可持续管理具有重要意义, 但当前草原生态价值尚未形成公认的评估框架和准确的核算方法。定位于北方草原, 以内蒙古天然草原为典型案例区, 提出了“支持-供给-调节-文化”服务价值四类共计 19 项的草原生态价值评估体系, 基于地面采样、野外观测、遥感解译、模型模拟和统计等多源数据, 在像元尺度上核算了 2000—2020 年草原生态价值并分析其空间分异特征和动态演变规律。结果表明: 近 20 年来内蒙古草原生态价值多年均值为 17640.60 亿元/a, 约为自治区同期国内生产总值 (GDP) (8607.23 亿元/a) 的 2.05 倍, 每公顷草原提供的生态价值为 2.34 万元/hm², 总体呈现“东北高—西南低”的空间分布格局特征。其中, 草原调节服务价值最高, 多年均值 6676.44 亿元/a, 占比 53.68%; 其次为草原支持服务价值, 多年均值为 6293.96 亿元/a, 占比 35.13%; 草原供给和文化服务价值多年均值分别为 3796.27 亿元/a (6.24%) 和 873.93 亿元/a (4.95%)。从具体指标来看, 防风固沙价值量最高 (5858.86 亿元/a 和 33.21%); 从各地区来看, 锡林郭勒盟草原生态价值最高 (4701.81 亿元/a 和 26.65%)。20 年间, 草原生态价值呈显著增加趋势 (439.45 亿元/a, $P < 0.05$), 其中以草原文化服务价值增加最为明显。本方法和案例可为量化草原生态价值提供参考范式, 并有助于生态产品价值实现机制的建立, 推动草原侵占用等生态补偿方案的优化。

关键词:生态价值; 像元尺度; 定量评估; 天然草原; 北方草原

Spatiotemporal variation characteristics of grassland ecosystem values and their differences in northern China from 2000 to 2020

ZHANG Haiyan¹, FAN Jiangwen¹, HUANG Lin¹, LI Yuzhe¹, CAO Wei¹, LIU Aijun², YANG Yong^{2,*}, ZHANG Yaxian³, CHANG Shujuan², WANG Suizi¹, REN Chuantao⁴, LI Jiahui¹, ZHU Bingshu¹, WANG Zong⁵, ZHANG Jinyu⁵

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Ministry of Natural Resources, Beijing 100101, China

2 Forestry and Grassland Monitoring Planning Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China

3 Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

4 Mudanjiang Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157000, China

基金项目:国家重点研发计划 (2021YFD1300501); 国家自然科学基金项目 (42007429); 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题 (2022KFKTC020); 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金 (中国水利水电科学研究院) (YSS202306)

收稿日期:2023-04-02; **网络出版日期:**2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangyong606@qq.com

5 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: As key terrestrial ecosystems and natural resources in China, grasslands can provide provisioning, supporting, regulating, and cultural ecological services, which are regarded as highly multifunctional ecosystems. It's of great significance for grassland protection, restoration, and sustainable management to assess ecosystem service value (ESV) of grasslands. However, currently, there still lacks a systematic and accurate assessment framework in service values of grassland ecosystem. This study focuses on the northern grassland of China and taking the natural grassland in the Inner Mongolia as a typical case area, we propose a calculation framework for assessing grassland ESV index, comprising 19 different indicators for provisioning, supporting, regulating and cultural ESV. Based on the multi-source data such as ground sampling, field observation, remote sensing interpretation, model simulation, and statistics, we calculated the grassland ESV at the grid scale from 2000 to 2020 and then analyzed their spatial differentiation characteristics and dynamic evolution. The results showed that the mean annual grassland ESV in the Inner Mongolia during the last 20 years was 1764.06 billion yuan/a, equivalent to 2.05 times of GDP (8607.23 billion yuan/a) in the Inner Mongolia during the same period, showing a spatial distribution pattern of "high in the northeast and low in the southwest". The ESV provided by grassland per unit area was 23400 yuan/hm². Among them, 53.68% came from grassland regulating services with the highest mean annual value of 6676.44 billion yuan/a, mostly provided in Hulunbuir City, Xing'an League, and Xilingol League, etc. 35.13% came from grassland supporting services with a multi-year average of 6293.96 billion yuan/a. The multi-year average values of grassland provisioning and cultural services were 3796.27 billion yuan/a (6.24%) and 873.93 billion yuan/a (4.95%), respectively. From the perspective of specific indicators, the wind erosion prevention services in grassland had the highest value of 5858.86 billion yuan/a and occupied 33.21%. From the regional perspective, Xilingol League had the highest grassland ESV of 4701.81 billion yuan/a and occupied 26.65%. Over the past 20 years, grassland ESVs showed a significant increase trend of 439.45 billion yuan/a, among them the cultural services increasing mostly. This method and case study can provide a reference paradigm for assessment of grassland ecosystem values, contribute to establish a sound mechanism for realizing ecosystem product value, and promote the optimization of ecological compensation schemes such as grassland encroachment and occupation.

Key Words: ecosystem values; pixel scale; quantitative evaluation; natural grassland; Northern Grassland

草原是我国重要的陆地生态系统和自然资源,主要于我国重要生态屏障区、边疆地区、少数民族聚集区、贫困人口集中分布区等叠加区域,对于维护国家生态安全和促进经济社会可持续发展具有基础性、战略性作用^[1-2]。第三次全国国土调查结果显示全国草地面积为 26453.01 万 hm²,略低于林地面积,是耕地面积的 2.06 倍。草原生态系统服务是指草原生态系统结构、过程和功能的维持会产生出对人类生存和发展有支持和满足作用的产品、资源和环境^[3-5],反映了草原生态系统维持地球生命系统和提供人类福祉的能力^[6-7]。草原生态价值主要由草原生态系统结构与功能决定指可向人类提供可量化的货币衡量以及存在潜在货币化的各种服务及惠益的价值化形式,是构筑生态和社会系统之间的桥梁^[8-9]。但当前我国草原生态系统整体仍较脆弱,加之长期以来对草原生产属性与区域 GDP 的关注远高于生态属性,草原保护力度不够、利用管理水平不高、科技支撑能力不足、草原资源底数不清等问题依然突出。因此开展草原生态价值核算不仅能够促进草原生态服务监测评估^[10],推动生态资源资产化、生态资产资本化,提高人类福祉,促进区域可持续发展,而且还能提升人们对生态产品价值的认识,助力生态产品交易,是践行“绿水青山就是金山银山”的两山转化理念和推进生态文明建设的有益探索^[11]。

生态价值是生态产品价值和生态系统生产总值(Gross Ecosystem Product, GEP)核算的基础,其核算逐渐由学术研究发展成为全国重点推进的基础性工作,“建立生态产品价值实现机制”已被列入党的第二十次全国代表大会报告。当前我国的与生态价值核算试点区域已超过 17 个省份、50 个地级市、160 个县区,至少 15 个省份相继出台建立健全生态产品价值实现机制文件,投入金额 3 亿余元^[12-13]。而生态产品价值难点集

中于“度量难、交易难、变现难、抵押难”,其中“度量难”是首先要解决的关键问题。国际上,生态系统服务研究为我国进行生态价值的核算提供了重要借鉴,1997 年,Costanza 等最早测定了 17 类全球生态系统价值^[14],Daily 等在类型内部进一步细化形成 13 类生态系统服务功能分类^[4];随后,2005 年联合国千年生态系统评估系统(Millennium Ecosystem Assessment, MA)建立了分类体系强、覆盖面广的供给服务、调节服务、文化服务和支撑服务等四种 23 类生态系统服务框架^[15],并沿用至今。国内而言,生态价值相关核算分为科学探索阶段(1997—2012 年)、实践推进阶段(2012—2021 年)和深化铺开阶段(2021 年至今)等三个阶段^[16],核算方法从技术流派上主要分为生物物理模型法^[17]、当量因子法^[18]、能值分析法^[19]和统计报表法^[12]四类。其中,生物物理模型法利用了本地化的监测数据与模型参数,采用科学模型来计算生态系统服务物质质量,核算精度高,对本地化决策支持最强,但对数据的要求高,且计算人员需要掌握大量生态机理方面的专业知识;当量因子法数据需求少、简单易掌握,适用于大尺度核算,但核算精度不高、误差大;能值分析法可实现不同类别生态服务价值量纲统一,适用于非货币化体系评估,但理论仍存在缺陷,能量值本土化问题尚未解决;统计报表法初步实现了核算结果的可重复、可比较、可应用,可进行业务部门的自主化核算,但仍处于探索阶段,统计经验模型与本地化参数数据集不够完善。总结当前生态价值的核算,主要存在以下三方面的问题:一是生态价值的内涵模糊,评价指标不明确且有重复,核算范围不统一,核算结果不同地区不可比;二是生态服务物质质量测量模型中多数以经验参数为主,而未充分利用本地调查监测数据,体现不出区域自然资源特色^[15],评估方法不确定性大,价值量定价主观性强;三是地面获取的指标项相对匮乏,且数据来源多样,难以保证精度。

草原具有防风固沙、涵养水源、固碳释氧、食物供给、水土保持、美学等多元生态服务^[20],是高度多功能性的生态系统^[21]。大多数关于草原生态价值的定量评估最多考虑六项服务^[6],远低于“生态系统服务共同国际分类”(CICES)^[22]数量,只有对草原生态价值进行全面评估,才能为资源管理决策提供更有价值的信息。同时,随着人类从过去对经济效益的强烈对逐渐转变为追求生态系统服务人类福祉的最大化追求^[23],不同类型的生态系统、不同功能的价值量应需要采取不同的核算方法,而相较于森林^[24]、湿地^[25]和荒漠^[26]等生态系统,草原生态价值在全国范围内尚未形成公认的理论评估框架和精确的核算方法。此外,由于草原调查监测获取机理参数有限,导致某些重要核算科目缺失,且已有评估结果呈 4—6 倍数量级的差距^[18,27],亟需对草原生态价值进行准确全面的评估。

从我国草原四大分区来看,北方草原面积占比最高(40.72%)^[28],地理跨度最大,草原类型和生物多样性最丰富,具有水库、钱库、粮库、碳库“四库”功能,成为“绿水青山”与“金山银山”合二为一的有机体。其中,内蒙古拥有我国北方最具代表性、连片面积最大的草原,不仅是我国重要的农畜产品生产基地和战略能源基地,而且也是我国向北开放重要桥头堡和北方重要的生态安全屏障。鉴于此,本文定位于我国北方草原,以内蒙古草原为典型案例区,基于调查监测建立本地化核算参数数据集,构建统一范围、指标和方法的草原生态价值核算框架,提出公里网格尺度上草原生态价值核算方法,分析 2000—2020 年不同类别、不同类型和不同地区草原生态价值的时空动态变化特征,进一步揭示不同类型草原生态价值时空异质性。研究结果可为准确评估草原保护成效、合理实施草原征占用补偿提供科学数据,为促进草原生态资源资产化和生态资产资本化、提高草地生态系统的有效保护、科学管理和可持续发展等提供重要的理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域

内蒙古(97°12′—126°04′ E, 37°24′—53°23′ N)隶属于蒙古高原,东部和中西部地区气候分别属于温带季风气候和温带大陆性气候,降水量自东部 500 mm 递减至西部的 50 mm,而蒸发量则由东部的 1000 mm 增加到西部的 3000 mm,多大风天气,尤其是冬春季节风沙天气频繁,夏季短促而炎热,冬季漫长严寒。据 2020 年草原野外普查总面积为 7525.61 万 hm^2 ,草原占国土总面积的 65.66%,沿干旱梯度自东向西依次分布着温性草甸草原、温性典型草原、温性荒漠草原和温性荒漠等(图 1),其对应的地带性土壤类型从东到西依次为黑钙

土、栗钙土、钙棕土,主要包括呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原、乌兰察布草原、鄂尔多斯草原。其中,温性草甸草原面积占比约 10.53%,主要分布于大兴安岭山地及高平原的河流两岸、河谷、湖盆低地,建群种主要包括贝加尔针茅草甸和羊草等;温性典型草原占比约 34.83%,主要分布在内蒙古中、东部,主要包括大针茅、克氏针茅和羊草等类型的建群种;温性荒漠草原和温性荒漠占比分别为 14.17%和 23.19%,主要分布在分布于阿拉善盟,以短花针茅和小针茅等为建群种。由于独特的草原景观和良好的生态环境,截至 2020 年全区共有 328 家 A 级旅游景区,旅游业已经成为内蒙古当地重要的收入来源。

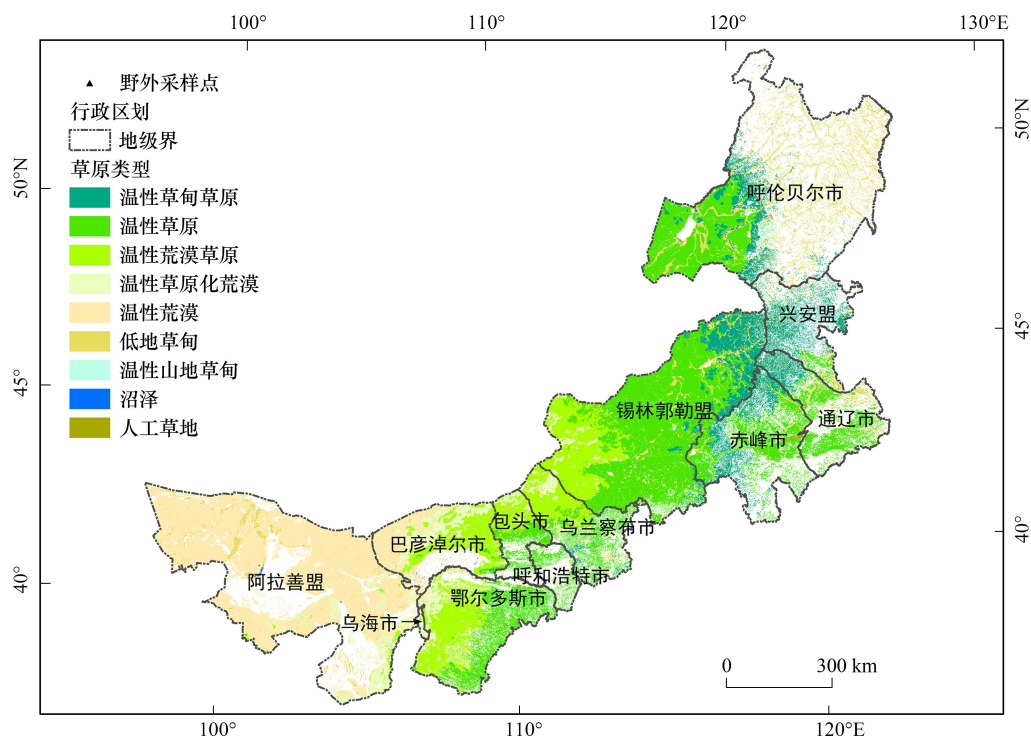


图 1 研究区草原类型空间分布

Fig.1 Spatial distribution of grassland types in the study area

1.2 数据来源

本文所用的数据主要包括气象数据、遥感解译反演数据、地面调查数据、野外台站观测数据与社会经济数据等(表 1),统一为 1 km×1 km 分辨率,时间分辨率为年,主要用于草原生态系统服务的物质质量相关参数计算与模型模拟,并应用 ArcGIS 软件进行类型赋值和空间插值等方法将统计数据由表格形式转化为矢量数据,进而统一转化为 TIFF 格式的栅格数据,最终实现公里像元尺度上的空间分析。

1.3 草原生态价值核算方法

1.3.1 生态价值评价指标体系

草原生态系统服务具有复杂性和多维性,本研究以公众接受度最高的 MA 生态系统服务分类框架为基础,结合“两山理念”和“GEP 理论”^[29],依据可持续原则、适用性原则、科学性原则,基于内蒙古自然禀赋与草原功能属性,构建了由“支持-供给-调节-文化”四类服务价值共计 11 项二级指标类别和 19 项具体指标的草原生态价值评估指标体系(表 2)。内蒙古等北方草原是风沙起源地,生态环境脆弱,关系着华北、东北、西北乃至全国生态安全,因此防风固沙优先纳入支持服务价值评价指标^[30]。此外,草本植物紧贴地面生长,根系发达,覆盖裸露地面,增强地表粗糙度,阻缓径流,拦截泥沙,起到固土和养分循环的作用,因此土壤保持和养分输入等价值也纳入核算指标^[17,27,31]。北方草原是我国重要的牧区,其中内蒙古草原位居我国五大牧区之首,牲畜及畜产品和可食牧草是直接货币量化的最大实物价值;内蒙古草原主要包括温性草原和草甸两

表 1 数据来源与预处理
Table 1 The sources and preprocessing of data

数据 Data	数据类型 Type	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	来源与预处理 Sources and processing
气象数据 Meteorological data	表格	—	日	气温、降水、风速、太阳辐射、蒸散发等来源于中国气象数据网 (http://data.cma.cn/), 应用 ANUSPLIN 空间插值。
雪深数据 Snow depth data	栅格	1 km	年	中国雪深长时间序列数据集 (1979—2021), 来源于国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/home)。
数据高程数据 Digital Elevation Mode (DEM) data	栅格	30 m	—	ASTER GDEM V2 数据, 来源于地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/) 进行拼接、裁切等。
土壤数据 Soil data	栅格	1:100 万	年	1:100 万土壤数据库来源于资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)。
植被指数数据 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data	栅格	1 km	16d	2000—2020 年的 MOD13A2 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/) 经投影转换、镶嵌、裁切等获取覆盖研究区逐年的 NDVI 数据。
净初级生产力数据 Net Primary Production (NPP) data	栅格	500 m	16d	2000—2020 年的 MOD17A3 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/) 经投影转换、镶嵌、裁切等获取覆盖研究区逐年的 NPP 数据。
草原分布数据 Grassland distribution data	矢量	—	年	参考内蒙古自治区林业和草原监测规划院草原调查数据。
地面调查数据 Ground survey data	表格	—	年	植被覆盖度、生物量、草原类型、建群种等来源于课题组多年野外样点采样数据, 样方大小为 0.25 m×0.25 m。土壤侵蚀验证主要采用 0—30 cm 土壤采样, 室内 CS^{137} 同位素测定。
理化分析数据 Physical and chemical analysis data	表格	—	年	土壤养分 N、P、K 和有机质含量等基于室内试验和理化分析实验测得。
野外采样数据 Field sampling data	表格	1 m	年	来源于课题组自全国第一次草原资源统一调查 (1979—1994 年) 至 2020 年的多年野外调查采样与数据积累。
野外台站观测数据 Field station observation data	表格	—	日	降水、蒸散发、通量、地表径流、草原植被冠层截留等主要生态过程参数等野外科学观测数据, 来源于中国生态系统研究网络 (CERN)。
物种分布数据 Species distribution data	矢量	—	—	通过文献荟萃、野外调查与历年草原调查报告等获取, 参照《中国物种红色名录 (2004 年版)》第 1 卷 (红色名录) 中的标准, 分为极危、濒危、易危和近危 4 个等级。
密度数据 Density data	栅格	1 km	年	人口密度和 GDP 密度来源于资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn) 进行裁切与投影转换等。 肉、奶等畜产品和动物皮毛等生产原材料的产量与市场价格数据、A 级景区空间分布数据、旅游业收入等产业数据来源于 2000—2021 年《内蒙古自治区》统计年鉴、各盟 (市) 统计年鉴、政府工作报告、中国物价年鉴等中国知网公开发表的科技文献数据以及内蒙古文化和旅游厅, 并结合调研整理汇总和统计分析。
统计数据 Statistical data	表格	县	年	

种植被型、38 种群系类型、131 种重点保护草原野生植物,生物多样性丰富。供给服务价值能有效保障生态安全与推动社会经济发展,因此本文主要选择牧草供给、食物供给、生产原材料供给和种质资源保育四类价值指标来进行量化^[32—33]。草原的调节服务价值虽无法直接商品化估值,但对维护支撑地球生命系统必不可少,草本植物生长不仅通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,而且还能够充分截留降水和锁住地表水分,调节地表净流量,因此草原调节服务价值需要考虑水源涵养、气候变化减缓、微气候调节和空气质量调节等方面,是形式最广、纳入指标最多的生态价值^[30,35—38]。文化服务价值是人与自然生态系统相互作用的价值体现,本文主要选取草原生态旅游价值、草原文化旅游价值和草原康养价值等作为具体量化指标^[39—40]。

表 2 草原生态价值核算指标体系

Table 2 Estimation index system of grassland ecological values							
生态价值评估指标 Ecological value assessment indicators			主要参数与计算方法 Main parameters and calculation method				
价值类别 Value categories	价值分项 Value breakdown	价值指标 Value metrics	物质量名称 Mass parameters	计算方法 Calculation method	价值量名称 Valued parameters	计算方法 Calculation method	
Ⅰ 草原支持服务价值 Supporting service of grassland	Ⅰ 1 土壤保育价值	Ⅰ 1-1 土壤保持价值	土壤保持量	RUSLE 模型 ^[30]	减少泥沙淤泥	替代成本法 ^[33]	
		Ⅰ 1-2 防风固沙价值	防风固沙量	RWEQ 模型 ^[30-31]	生物固沙成本	恢复成本法 ^[27,35]	
		Ⅰ 1-3 土壤养分固持价值	土壤养分固持量	土壤类型赋值法	有机肥市场价格	替代市场法 ^[17,35]	
	Ⅱ 草原供给服务价值 Provisioning service of grassland	Ⅰ 2 养分输入价值	Ⅰ 2-1 养分输入价值	草原养分形成量	草原类型赋值法	有机肥市场价格	
Ⅱ 1 牧草供给价值		Ⅱ 1-1 牧草供给价值	牧草产量	地上生产力模型法 ^[30]	同类饲料市场价格	市场价值法 ^[9,35]	
Ⅱ 2 食物供给价值		Ⅱ 2-1 畜产品供给价值	牛肉、羊肉、牛奶等产量	统计分析	畜产品市场价格	市场价值法 ^[9,35]	
Ⅱ 3 生产原材料供给价值		Ⅱ 3-1 生产原材料供给价值	牛皮、羊皮、羊绒等动物性生产原材料产量	统计分析	生产原材料市场价格	市场价值法 ^[9,35]	
Ⅲ 草原调节服务价值 Regulating service of grassland	Ⅱ 4 种质资源保育价值	Ⅱ 4-1 物种保育价值	保护物种数	统计分析、实际调查 ^[32]	单位面积草原物种保育价值	机会成本法 ^[9]	
	Ⅲ 1 水源涵养价值	Ⅲ 1-1 水量调节价值	拦蓄降水量	水量平衡法 ^[33-34]	水库单位库容成本	影子工程法 ^[33,35]	
		Ⅲ 1-2 水质净化价值	水质净化量		污水处理价格		
		Ⅲ 2-1 固碳价值	植被碳固定量	固碳机理模型 ^[30]	植树造林成本	替代成本法 ^[35]	
Ⅳ 草原文化服务价值 Cultural service of grassland	Ⅲ 3 微气候调节价值	Ⅲ 3-1 降温价值	降温吸热量	蒸散模型 ^[36]	电费单价	替代成本法 ^[35]	
	Ⅲ 4 空气质量调节价值	Ⅲ 3-2 增湿价值	增湿量	蒸腾增湿法	电费单价	替代成本法 ^[35]	
		Ⅲ 4-1 释放氧气价值	植被释氧量	质量平衡法 ^[37]	医用氧气替代价格		
		Ⅲ 4-2 释放负氧离子价值	释放负氧离子量	植物净化模型 ^[38]	空气清新机日运行费用	替代成本法 ^[35]	
		Ⅲ 4-3 滞尘价值	滞尘量		削减灰尘成本		
	Ⅳ 1 景观游憩价值	Ⅳ 1-1 草原生态旅游价值	草原生态旅游产值	统计分析	草原生态旅游区的门票、交通、食宿等旅游收益	旅行费用法 ^[39-40]	
		Ⅳ 1-2 草原文化旅游价值	草原文化旅游产值				
		Ⅳ 1-3 草原康养价值	草原康养产值				

1.3.2 基于栅格动态变化的草原价值量化评估

草原生态系统物质质量反映了生态系统功能的可持续性,价值量反映草原生态系统功能的稀缺性。本文草原生态价值核算应用生物物理模型法,以草原生态系统服务的物质质量为基础,按照表 2 中构建的草原生态价值核算指标体系,借助价格将名目繁多且单位各异的物质产品与功能服务表达为可对比可应用的统一货币形式。首先,采用市场价值法,对牧草、食物和生产原材料实际产量通过市场实际交易价格来进行供给价值计算。草原通过生态系统结构与过程来有效减少径流量、降低近地表风速和稳固土壤来防止水土流失和起到防风固沙的作用^[30-31],利用内蒙古野外采样点获取的土壤容重、总氮、总磷、总钾和有机质等的含量,分别采用替代成本法^[33]和替代市场法^[17,35]来计算减少泥沙淤积和有机肥方面的价值;依据《内蒙古自治区草原植被恢复费征收使用管理办法》和植树种草成本等恢复成本法来计算生物固沙工程成本与维护费用^[27,35]。草原具有生物的繁育、基因以及遗传信息等保育价值作用,且物种越稀缺,保育价值越高^[32],本文基于 Meta 分析与野外调查数据利用物种濒危和特有程度来划定单位面积物种多样性保育价值量^[33]。草原植被可对降水等进行截流、渗透、蓄积,并通过蒸散等对水流、水循环等进行调控,缓和地表径流量、补充地下水并减缓河流量季节变动等^[34],利用影子工程法,以水库单位库容的工程造价成本来进行价值量评估^[35]。草原植被通过物质循环活动,吸收和固定 CO₂,释放氧气和负氧离子,并吸附空气中的 SO₂和粉尘等,起到抑制温室效应、净化空气、改善人居环境等作用^[36-38]。研究运用 NPP 估算干物质质量,依据光合作用方程式计算相应的固碳量和释氧量,同时应用植物净化模型^[38]计算负氧离子释放量和滞尘量,采用替代成本法^[35]分别依据中国碳交易均价与种草成本、医用氧气替代价格、空气清新机日运行费用、削减灰尘成本等进行相关价值量估算。草原独特的文化景观与优质的空气质量,并衍生出特色民族文化(如那达慕民间文化),具有草原生态旅游、文化旅游和康养等价值^[39],本文应用旅行成本法来测算文化服务价值^[40]。

基于以下公式分项汇总得到内蒙古草原生态产值:

$$GEV = ESV + EMV + ERV + ECV \quad (1)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^n SM_i \times PS_i \quad (2)$$

$$EMV = \sum_{j=1}^n EM_j \times PM_j \quad (3)$$

$$ERV = \sum_{k=1}^m ER_k \times PR_k \quad (4)$$

式中,GEV 为草原生态价值;ESV 为草原支持服务价值;EMV 为草原供给服务价值;ERV 为草原调节服务价值;ECV 为草原文化服务价值; SM_i 为第 i 类草原支持服务的物质质量; PS_i 为第 i 类草原支持服务的价格; EM_j 为第 j 类草原供给服务的物质质量; PM_j 为第 j 类草原供给服务的价格; ER_k 为第 k 类草原调节服务的物质质量; PR_k 为第 k 类草原调节服务的价格。

2 结果与分析

2.1 草原生态价值总体情况

2000—2020 年内蒙古草原生态总价值量多年均值为 17640.60 亿元/a,每公顷草原提供的生态价值量为 2.34 万元/a,总体呈现“东北高—西南低”的空间分布格局特征(图 2)。从空间分布来看,草原生态价值高值区主要集中在锡林郭勒盟和呼伦贝尔市等东部地区,阿拉善盟、巴彦淖尔市等西南荒漠地带草原价值较低。

从各类别来看,草原调节服务价值最高,单位面积均值为 8871.63 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,多年均值为 6676.44 亿元/a,占草原生态总价值量的 53.68%,主要包括固碳价值、释放氧气价值和水量调节价值等,分别占调节服务价值的 40.71%、35.69%和 15.38%(图 3),呼伦贝尔市、兴安盟、锡林郭勒盟等东北部地区草原生态价值较高,而阿拉善盟等西南部较低。其次为草原支持服务价值,单位面积均值为 8363.39 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,多年均值为 6293.96 亿元/a,占草原生态总价值量 35.13%,以防风固沙价值为主,占草原支持服务价值量的比例高达

93.09%,其中高值区集中在阴山北部林草交界处与呼伦贝尔沙地农牧交错带等区域。草原供给服务价值单位面积均值分别为 5044.46 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,多年均值为 3796.27 亿元/a,占草原生态总价值量的 6.24%,主要构成中占比较高的是物种保育价值和畜产品供给价值,分别占草原支持服务价值的 73.58%和 18.69%,以内蒙古东北部草甸草原分区地区较高。草原文化服务价值单位面积均值为 1161.27 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,多年均值为 873.93 亿元/a,占草原生态总价值量的 4.95%,以景观游憩价值为主,以呼和浩特、乌兰察布等地区较高。

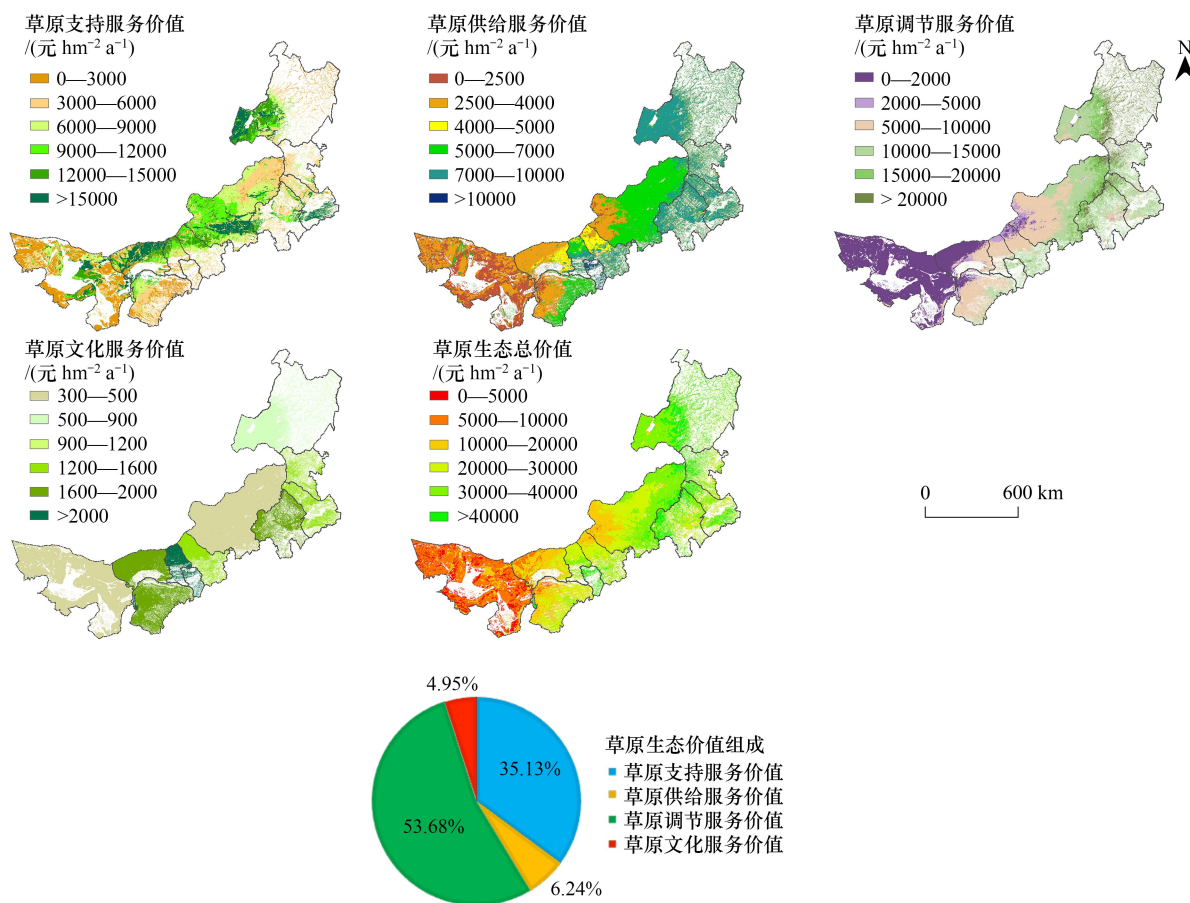


图 2 2000—2020 年内蒙古草原生态总价值量多年均值构成及空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of grassland ecosystem values in Inner Mongolia from 2000 to 2020

从草原生态系统服务价值具体类型看(图 3),草原防风固沙价值最高,单位面积多年均值为 7785.23 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,价值总量为 5858.86 亿元/a,约占草原总生态价值的 33.21%;其次草原物种保育价值也较高,内蒙古独具有沙冬青、四合木、梭梭、戈壁短舌菊、蒙古短舌菊等濒危或特有物种,单位面积多年均值为 3711.47 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,价值总量为 2793.11 亿元/a,约占草原总生态价值的 15.83%;此外,草原固碳和氧气释放价值也较高,单位面积多年均值分别为 3166.05 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 3612.07 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,价值总量分别为 2382.65 亿元/a和 2718.30 亿元/a,占比分别为 13.51%和 15.41%;此外,草原的水量调节、景观休憩和畜产品供给价值量也较高,单位面积多年均值分别为 1364.43 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、1161.27 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 942.78 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,价值总量分别为 1026.82 亿元/a、873.93 亿元/a和 709.50 亿元/a,占比分别为 5.82%、4.95%和 4.02%。因生态系统服务功能之间存在协同与权衡关系,内蒙古草原的土壤保持价值、养分输入价值、生产原材料供给价值、水质净化价值、降温价值、增湿价值和滞尘价值较低,多年均值在 200 亿元/a 以下,占比不足草原生态总价值的 1%。

2.2 草原生态价值的动态变化特征

内蒙古草原生态价值从 2000 年的 13233.97 亿元增加至 2020 年的 21571.08 亿元,增幅达到 63.00%,多

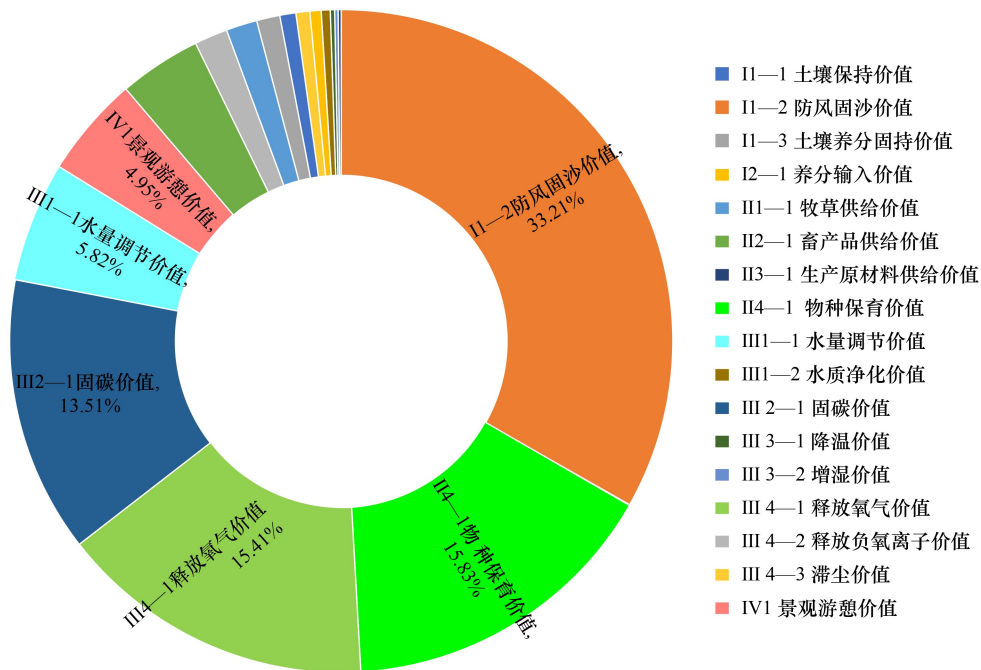
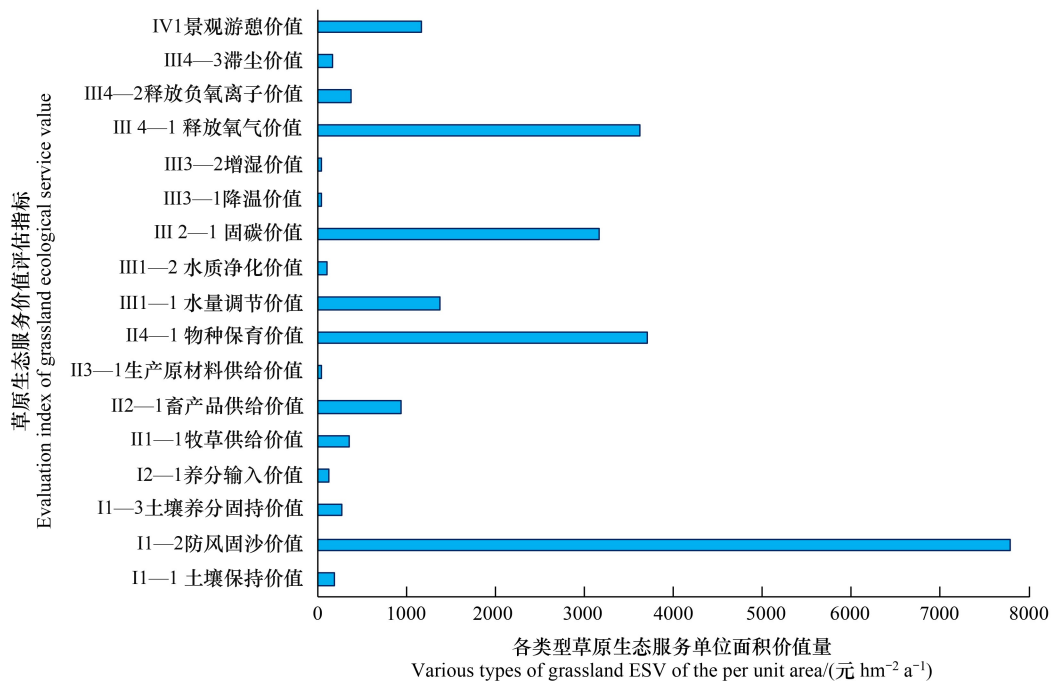


图 3 内蒙古草原生态价值构成

Fig.3 Estimation index system of grassland ecological values in Inner Mongolia

年变化趋势为 439.45 亿元/a。近 20 年来,草原生态总价值以 439.45 亿元/a 倾斜率呈显著增加趋势 ($P < 0.05$),四类生态价值均有不同程度地增加。其中,草原文化服务价值增幅极大,达到 55.32 倍,多年变化趋势为 132.48 亿元/a ($P > 0.05$);草原支持服务价值的变化幅度其次,增幅达到 60.02%,多年变化趋势为 117.64 亿元/a ($P > 0.05$);此外,草原调节服务价值变化趋势也较大,多年倾斜率为 121.50 亿元/a ($P < 0.05$),增幅为 48.45%;草原供给服务价值增幅(43.04%)和多年变化趋势均最低(67.83 亿元/a, $P < 0.05$)。

虽然 2000—2020 年发展变化来看,内蒙古自治区 GDP 与草原生态服务价值之间差距不断缩小,但单一

GDP 增速无法实现区域可持续发展,而生态产值对社会经济发展具有重要支撑作用^[41]。通过现状分析,2020 年草原生态价值(21571.08 亿元)是内蒙古整个自治区同年 GDP(17359.80 亿元)的 1.24 倍;多年均值来看,20 年间草原生态价值多年均值(17640.26 亿元/a)为自治区同期 GDP 总量(8607.23 亿元/a)的 2.05 倍(图 4)。

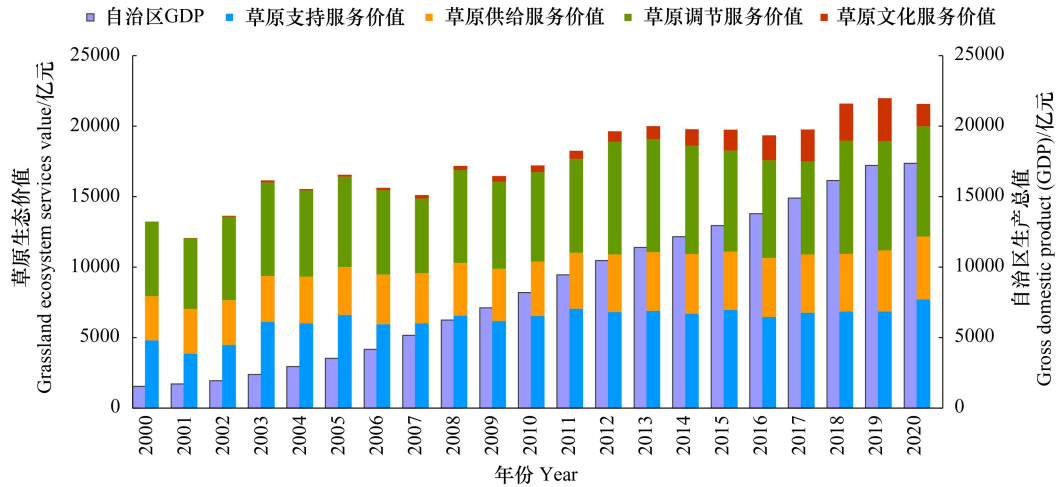


图 4 2000—2020 年内蒙古研究区草原生态价值与地区生产总值(GDP)对比分析

Fig.4 Grassland ecosystem services value and Gross domestic product (GDP) in Inner Mongolia for the period 2000—2020

2.3 不同类型草原生态价值量特征分析

由于不同草原类型具有不同的植被群落结构和生物量,因而相应的生态服务功能和价值量有所不同。内蒙古不同类型草原单位面积生态价值的核算结果表明(图 5):不同类型草原生态价值相差较为悬殊,过去 20 年间,最低为温性荒漠 4959.14 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (2001 年),最高为温性山地草甸 51232.47 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (2018 年)。从多年均值来看,温性山地草甸单位面积的生态价值最高,多年均值为 43645.46 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$;其次是温性草甸草原,单位面积生态价值多年均值为 37799.80 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$;温性草原和低地草甸的单位面积生态价值相近,多年均值分别为 31078.68 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 31133.49 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$;此外,还有沼泽类单位面积生态价值多年均值(27514.42 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)高于全区均值;温性荒漠草原、温性草原化荒漠和温性荒漠单位面积生态价值均低于

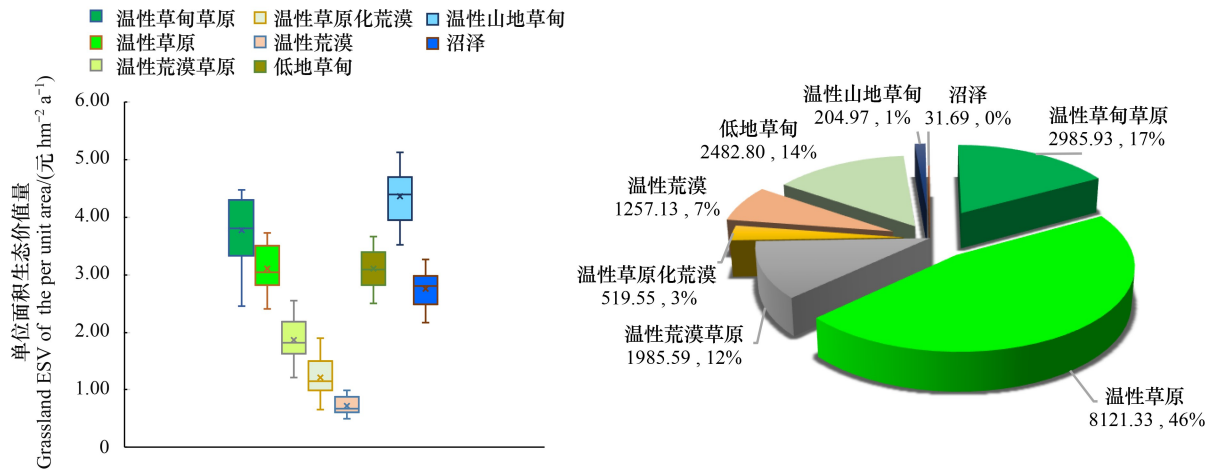


图 5 2000—2020 年内蒙古不同类型草原生态服务单位面积价值量和总价值量

Fig.5 Various types of grassland ecosystem services value of the per area and total in Inner Mongolia from 2000 to 2020

全区均值。

从各类型草原生态价值总量来看(图 5),虽然温性草原单位面积均值不是最高的,但因面积最大(图 1),因此总量稳居首位(8121.33 亿元/a),约占研究区草原生态总价值的 46.17%;其次是,温性草甸草原、温性荒漠草原和低地草甸,总量分别占研究区草原生态总价值的 16.98%、12.29%和 14.12%;温性荒漠生态价值量占研究区草原生态总价值的 7.15%;其余各类型草原生态价值占比不足 5%。

2.4 草原生态价值多维度评价

近 20 年间内蒙古各盟市中,锡林郭勒盟草原生态价值最高,多年均值为 4701.81 亿元/a,占比为 26.65%,其中以土壤保育价值(1988.97 亿元/a)、空气质量调节价值(850.52 亿元/a)、种质资源保育价值(775.30 亿元/a)和气候变化减缓价值(609.60 亿元/a)较高;乌海市草原生态价值最低,多年均值为 30.62 亿元/a,其中以休闲游憩价值为高(13.78 亿元/a)。此外,呼伦贝尔市的草原生态价值较高,多年均值为 3535.38 亿元/a,占比为 20.04%;阿拉善盟、赤峰市、通辽市和鄂尔多斯市草原生态价值均超过 1000 亿元/a;呼和浩特市、包头市、乌兰察布市和兴安盟生态价值介于 500—1000 亿元/a 之间;巴彦淖尔市的草原生态价值低于 500 亿元/a(图 6)。

将各盟市主要生态服务价值进行横向对比可知,各盟市土壤保育价值相对其他生态服务价值较高,特别是锡林郭勒盟、阿拉善盟与呼伦贝尔市,区域防风固沙价值尤为突出,多年均值超过了 1000 亿元/a;呼伦贝尔市与锡林郭勒盟空气质量调节价值较高,多年均值超过了 800 亿元/a;锡林郭勒盟、鄂尔多斯市与阿拉善盟,当地种质资源保育价值较突出,超过了 400 亿元/a;锡林郭勒盟、呼伦贝尔市与赤峰市草原的气候变化减缓效益较突出,均超过 200 亿元/a。不同盟市间草原生态系统主要服务存在较大差异,同一生态服务价值也存在较大差距(图 6)。

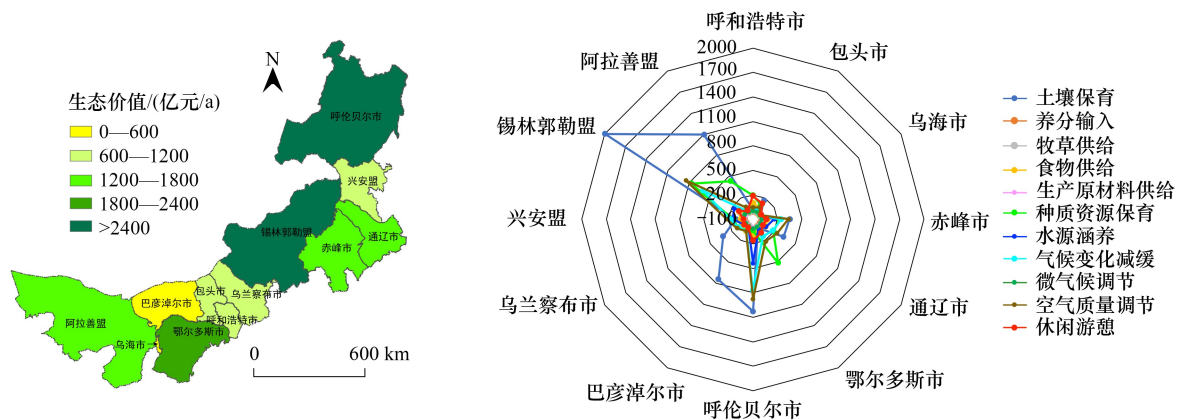


图 6 2000—2020 年内蒙古各盟市草原生态价值多维度评价

Fig.6 Multidimensional evaluation of grassland ecosystem services value in different areas of Inner Mongolia from 2000 to 2020

3 讨论

3.1 与前人研究的对比分析

核算指标选取是草原生态价值核算框架的关键所在,与前人的研究对比,本研究所确定的草原价值核算指标最为全面,并使用区域实地采样或调研数据进行了实证研究,生成了内蒙古近 20 年草原生态价值一张图。当前草原生态价值核算体系主要依据数据的可获取性和核算方法的明确性,参照 Costanza^[14]提出的生态功能指标,集中选取供给、调节和文化服务三类,具体包括有机物生产(太阳能固定及食品生产功能或畜产品)、涵养水源、水土保持、防风固沙、固碳释氧、净化空气、营养物质循环、娱乐与文化(生态旅游)、废弃物处理、维持生物多样性等指标,数量在 3—17 种。当前研究部分停留在理论层面的探讨^[42],或选取几项代表性

的草原生态服务进行核算^[27,43-44],或直接采用单位面积价值当量因子法^[18,45],体现不出草原生态价值全局价值和空间异质性规律。价值评估方法因草原生态服务功能的类型不同而异,主要包括直接市场法、替代市场法、假想市场法、价值转移法和能量货币法等,定价主观性强,同一核算科目定价可相差高达 50 倍^[16]。而草原生态价值具有明显的地域差异性,并随时间变化和供需关系情况呈现波动变化,本研究采用针对草原调查监测单位、交易市场商户及牧民等进行了调研访谈和咨询当地相关专家,来分别确定各类型生态服务的定价,体现“优质优价、重要价高”特点。国内而言,研究范围包括全国草原^[18,27,43]、内蒙古典型草原^[44]、青藏高原高寒草原^[45]等,不同类型的天然草原生态价值相差悬殊,需针对其自身自然和经济特征,制定不同草原类型的生态价值核算体系,本研究测算范围面向的是我国北方温性草原,进行了分地区、分类型的核算与分析。

从 2019 年官方发布的数据来看,本研究草原生态价值总量(2.21 万亿元),约占内蒙古生态产品总值(4.48 万亿元)的 50%,是草原生态屏障带生态产品总值(1.94 万亿元)的 1.13 倍,数值略高但接近,数量级相当^[46];从文献 Meta 回归模型分析结果来看^[27],本研究中草原单位面积生态价值(2.34 万元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)与全国草原生态系统价值(2.35 万元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)相近,本研究中单位面积最高的草原调节服务价值(13153.78 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$),接近于温带草原调节经济价值 2525 美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (折合人民币 17393.39 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

然而,研究结果可能与以往部分学者的研究结果在全国或区域尺度上存在差异,如本文研究区草原生态价值多年均值为 23440.76 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,是谢高地等人^[18]计核算出的全国平均草原生态系统服务价值 509.40 美元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (折合人民币 3521.01 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)的 6.65 倍,是刘洋洋等人^[43]核算的 2000—2016 年草原生态系统服务价值 4124 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 的 5.68 倍;温性草原生态价值多年均值(8038.48 亿元/a)是闵庆文等人^[44]结果(3325.90 亿元/a)的 2.42 倍。产生上述较大差异主要在于研究时间段、评价指标和核算方法的不同,因受历史时期科学技术水平、计量方法和监测手段的限制导致有些指标难以获取,如上述研究中未将生物多样性^[44]、防风固沙^[31,47]、景观休憩^[48]等草原生态系统服务价值指标纳入核算体系。

3.2 特色与展望

当前公众在享受草原防风固沙、固碳释氧、生物多样性等草原生态系统服务同时,却未对草原生态价值形成广泛认知。本文提出了一套相对全面、科学的草原生态系统价值核算框架,并以内蒙古草原为典型案例进行系统核算,同时适用于蒙古高原典型温性草原、黄土高原暖温型荒漠草原、东北西部湿润草甸草原与西北荒漠草原等广阔的北方草原区域,可更好掌握评估区域内草原生态价值及其时空差异规律。该研究不仅完善生态价值核算基础理论和技术方法,提供了草原生态价值核算的案例展示,而且可为生态产品价值的实现机制提供准确的量化结果,打通了“绿水青山”与“金山银山”双向转化的关键环节,有助于实现生态环境与社会经济之间“双赢”,促进草原可持续发展。

本研究主要有以下三方面特色:首先,参考 MA 生态系统服务评估框架,选取了防风固沙、牧草供给、水源涵养、固碳和景观休憩等 19 项指标来进行草原生态价值计算,在兼顾生态价值评估的全面性基础上,突出了草原资源的特色,为草原生态产品价值核算提供数据模型与技术方法支撑,有助于从生态—社会系统协同演化的角度来推动草原生态服务流惠益的实现。其次,草原食物、生产原材料供给和景观休憩等指标尽可能在县及更小的空间单元上进行统计且采取适宜空间化方法,土壤侵蚀模数、产草量、水源涵养量等指标在模型模拟过程中均通过野外实验进行了参数本地化和精度验证,从而在公里网格尺度实现了草原生态价值量的核算,有助于在空间“一张图”上揭示草原生态价值的地理空间异质性。最后,以年作为时间尺度分析单元,定量核算了 2000—2020 年连续 20 年间草原生态价值,并刻画了其动态演变规律,区别于以往单一或零星年份,实现了静态与动态分析相结合,使评估结果对生态补偿等决策更具科学性。

另外研究还存在一些不确定性:一是当前草原文化方面,尚缺乏科学准确的物质质量核算方法,本文仅笼统地参照景区旅游收入,无法区分生态旅游、文化旅游和草原康养等各类具体收益,未来可考虑基于手机信令大数据应用区域成本法等来提升测算精度。二是由于生物多样性和社会经济数据受调查难度的限制,无法达到与遥感数据一致的空间分辨率,如物种数量仅能获取到草原类型尺度上,肉奶等畜产品仅能到县域尺度上。

三是生态价值的核算工作优化在一定程度上会促进草原资源调查监测力度,随着大数据、云平台等技术的发展,将来可以综合应用手机客户端、无人机影像等获取草原文化、调节和供给等相关服务定量、实时和实地信息,逐步建立不同区域、不同草原类型的本地化核算参数库,便于及时掌握草原生态价值变化。

4 结论

本文对内蒙古不同类型的草原生态系统服务价值进行了综合测算,建立了基于调查监测的本地化核算参数数据集,实现了公里网格尺度上草原生态价值核算,对 2000—2020 年内蒙古草原生态价值量构成及动态变化规律进行分析。内蒙古草原生态价值远高于同期 GDP,且近 20 年来草原生态价值显著增加,尤以文化价值增幅最为明显,表明草原具有巨大、丰富的生态价值,对区域可持续发展起着重要作用。调节服务价值量是内蒙古草原生态价值量各类别中最高的,草原固碳价值较大,在当前“双碳”背景下应予以重点关注。草原防风固沙是我国北方防沙带最关键的生态功能,其价值量在单项生态价值中最高。从单位面积价值量来看,不同草原类型的生态价值差异较大,其中温性山地草甸、温性草甸草原和温性草原三种类型生态价值较高。内蒙古草原生态价值分布具有明显的空间异质性,东部地区空气质量调节价值较高,中部地区种质资源保育价值较高,西部地区防风固沙价值量较高。本研究可为区域生态安全与可持续发展、生态补偿等提供重要科学依据。

参考文献(References):

- [1] 董世魁,唐芳林,平晓燕,杨秀春,杨智,林长存,卢欣石,王铁梅,纪宝明,徐斌,苏德荣. 新时代生态文明背景下中国草原分区与功能辨析. 自然资源学报, 2022, 37(3): 568-581.
- [2] 黄木易,岳文泽,方斌,冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [3] 赵萌莉,韩冰,红梅,韩国栋,张爱萍. 内蒙古草地生态系统服务功能与生态补偿. 中国草地学报, 2009, 31(2): 10-13.
- [4] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [5] 郑华,欧阳志云,赵同谦,李振新,徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118-126.
- [6] Costanza R, Liu S A. Ecosystem services and environmental governance: comparing China and the U.S. Asia & the Pacific Policy Studies, 2014, 1(1): 160-170.
- [7] Ouyang Z, Hua Z, Yang X, Polasky S, Daily G C. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [8] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. Ecosystem Services, 2019, 39: 1-17.
- [9] 国家林业和草原局草原标准化技术委员会, LY/T 3321—2022,草原生态价值评估技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [10] Richter F, Jan P, El Benni N, Luscher A, Buchmann N, Klaus V H. A guide to assess and value ecosystem services of grasslands. Ecosystem Services, 2021, 52: 1-17.
- [11] Fu B J, Liu Y X, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China. National Science Review, 2023, 10(7): 1-12.
- [12] 张林波,高艳妮. 生态系统生产价值核算与业务化体系研究:以厦门市为例. 北京: 科学出版社, 2020.
- [13] 张亚立,韩宝龙,孙芳芳. 生态系统生产总值(GEP)核算制度及管理应用研究——以深圳为例. 生态学报, 2023, 43(17): 1-12.
- [14] Costanza R, d'Arge R, deGroot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, vandenBelt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [15] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [16] 张林波,陈鑫,梁田,王昊,郝超志,任耀发,李宇昂,吴舒尧. 我国生态产品价值核算的研究进展、问题与展望. 环境科学研究, 2023, 36(4): 743-756.
- [17] 李芬,张林波,舒俭民,孟伟. 三江源区生态产品价值核算. 科技导报, 2017, 35(6): 120-124.
- [18] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,郑度,成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [19] Odm H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making. New York: Wiley, 1995.
- [20] Bengtsson J, Bullock J M, Egoh B, Everson C, Everson T, O'Connor T, O'Farrell P J, Smith H G, Lindborg R. Grasslands-more important for ecosystem services than you might think. Ecosphere, 2019, 10(2): 1-20.
- [21] Manning P, vander Plas F, Soliveres S, Allan E, Maestre F T, Mace G, Whittingham M J, Fischer M. Redefining ecosystem multifunctionality.

- Nature Ecology & Evolution, 2018, 2(3): 427-436.
- [22] Haines Young R, Potschin M. CICES V5. 1. Guidance on the application of the revised structure. Fabis Consult 2018, 53.
- [23] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [24] 国家林业和草原局. 森林生态系统服务功能评估规范: GB/T 38582—2020, 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [25] 国家林业局. 湿地生态系统服务评估规范: LY/T 2899-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [26] 国家林业局. 荒漠生态系统服务评估规范: LY/T 2006-2012. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [27] 黄季焜, 侯玲玲, 亢楠楠, 刘会芳, 吕欣欣, 张岩, 仇焕广, 龚亚珍, 南志标. 草地生态系统服务经济价值评估研究. 中国工程科学, 2023, 25(1): 198-206.
- [28] 田海静, 王林, 石俊华. 近 20 年中国北方草原植被长势动态监测. 草业科学, 2020, 37(11): 2165-2174.
- [29] 中华人民共和国生态环境部. 陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
- [30] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, Zhong H P, Harris W, Gong G L, Zhang Y X. Changes in multiple ecosystem services between 2000 and 2013 and their driving factors in the Grazing Withdrawal Program, China. Ecological Engineering, 2018, 116: 67-79.
- [31] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, Harris W, Li Y Z, Chi W F, Wang S Z. Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1038-1050.
- [32] Lyons K G, Brigham C A, Traut B H, Schwartz M W. Rare species and ecosystem functioning. Conservation Biology, 2005, 19(4): 1019-1024.
- [33] Munoz-Pina C, Guevara A, Torres J M, Brana J. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. Ecological Economics, 2008, 65(4): 725-736.
- [34] Wang S Z, Fan J W, Li Y Z, Wu D, Zhang Y X, Huang L. Dynamic response of water retention to grazing activity on grassland over the Three River Headwaters region. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 286: 1-12.
- [35] Li J H, Huang L, Cao W. An influencing mechanism for ecological asset gains and losses and its optimization and promotion pathways in China. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(10): 1867-1885.
- [36] Larondelle N, Haase D. Urban ecosystem services assessment along a rural - urban gradient: A cross analysis of European cities. Ecological Indicators, 2013, 29: 179-190.
- [37] Lu F, Hu H, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [38] Baro F, Chaparro L, Gomez-Baggethun E, Langemeyer J, Nowak, D J, Terradas J. Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. Ambio, 2014, 43(4): 466-479.
- [39] 李佳慧, 黄麟, 曹巍, 吴丹. 长三角重点生态功能区生态资产损益核算. 自然资源学报, 2022, 37(8): 1946-1960.
- [40] Sinclair M, Mayer M, Woltering M, Ghermandi A. Valuing nature-based recreation using a crowdsourced travel cost method: a comparison to onsite survey data and value transfer. Ecosystem Services, 2020, 45: 1-9.
- [41] Ma G, Wang J, Fang Yu, et al. Framework construction and application of China's Gross Economic-Ecological Product accounting. Journal of Environmental Management. 2020, 264: 109852.
- [42] 尹剑慧, 卢欣石. 草原生态服务价值核算体系构建研究. 草地学报, 2009, 17(2): 174-180.
- [43] 刘洋洋, 任涵玉, 周荣磊, 巴桑参木决, 张伟, 章钊颖, 温仲明. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析. 草地学报, 2021, 29(7): 1522-1532.
- [44] 闵庆文, 刘寿东, 杨霞. 内蒙古典型草原生态系统服务功能价值评估研究. 草地学报, 2004, 12(3): 165-169, 175.
- [45] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 郑度. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估. 山地学报, 2003, 21(1): 50-55.
- [46] 内蒙古自治区研究室, 生态环境研究中心, 内蒙古自治区农牧业科学院, 中国科学院地理科学与资源研究所. 内蒙古生态产品总值(GEP)核算报告. 中国发展出版社, 北京: 2021: 152-161.
- [47] Zhang H Y, Fan J W, Wang J B, Cao W, Harris W. Spatial and temporal variability of grassland yield and its response to climate change and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 1988 to 2013. Ecological Indicators, 2018, 95: 141-151.
- [48] Chen H J. The ecosystem service value of maintaining and expanding terrestrial protected areas in China. Science of the Total Environment, 2021, 781: 1-10.