

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0283

刘华超,任春颖,王宗明,等.大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及权衡协同关系研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(5):587-598.

LIU Hua-chao,REN Chun-ying,WANG Zong-ming,et al.Dynamics of Ecosystem Service Functions and Their Tradeoff and Synergetic Relationships in Great Xing'an Mountains Ecological Function Zone[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2022,38(5):587-598.

大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及 权衡协同关系研究

刘华超^{1,2}, 任春颖¹*, 王宗明¹, 张 柏¹ (1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大兴安岭水源涵养与生物多样性保护区是我国北方重要的生态屏障,定量分析其生态系统服务功能动态及内在关系,对于实现该区自然资源的合理利用与可持续发展具有重要的科学意义。基于多源数据和生态系统服务功能评估模型,实现了2000—2015年大兴安岭生态功能区水源供给、碳储存和生境质量服务功能的动态评估,并结合相关性分析和权衡协同度模型探讨各服务功能之间的权衡协同关系。结果表明:(1)林地是该区优势生态系统类型,占功能区总面积的67.80%,湿地和草地次之,3种类型面积之和占功能区总面积的92.35%。2000—2015年,林地面积增加2 080 km²,草地和湿地面积分别减少1 365和1 265 km²,其他类型面积变化较小。(2)2000—2015年研究区水源供给服务功能明显减弱,碳储存服务功能有所增强,生境质量改善显著。其中,水源供给量减少15.10亿 m³,碳储量增加16.79 Tg,良好及以上生境面积增加5 746 km²,占生态功能区总面积的85.41%,生物栖息活动区生境质量显著提高。(3)在区域和地级市尺度上,水源供给与碳储存呈权衡关系,碳储存与生境质量呈协同关系。水源供给与生境质量在区域尺度上表现为权衡关系,但在地级市尺度上赤峰市和黑河市表现为权衡关系,大兴安岭和通辽市表现为协同关系。研究结果可以为区域自然资源管理和生态规划、生态系统服务总体效益提升等提供重要的数据支持和决策依据。

关键词: 生态系统服务功能; 大兴安岭生态功能区; 时空变化; 权衡协同

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)05-0587-12

Dynamics of Ecosystem Service Functions and Their Tradeoff and Synergetic Relationships in Great Xing'an Mountains Ecological Function Zone. LIU Hua-chao^{1,2}, REN Chun-ying¹*, WANG Zong-ming¹, ZHANG Bai¹ (1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water retention and biodiversity conservation zone of Great Xing'an Mountains is an important ecological barrier in North China. Quantitative analysis of dynamics and internal relationship among the ecosystem service functions is of great scientific significance for reasonable utilization of natural resources and sustainable development in this region. Based on multi-source data and the models for ecosystem service function evaluation, dynamics of service functions in the ecological functional zone of Great Xing'an Mountains during 2000–2015 was analyzed, including water supply, carbon storage and habitat quality function. Furthermore, this study discussed the balance and coordination among the ecosystem service functions through the combination of correlation analysis and trade-off and synergic relation model. The results were concluded as follows: (1) woodland was the dominant ecosystem in this region, accounting for 67.80% of the total area, followed by wetland and grassland. The three ecosystem types accounted for 92.35% of the total area. During 2000–2015, woodland increased by 2 080 km², while grassland and wetland decreased by 1 365 and 1 265 km², respectively. The area of other ecosystems changed insignificantly. (2) From 2000 to 2015, the function of water supply was obviously weakened, carbon storage was enhanced slightly, and the habitat quality was significantly improved. Wherein, water

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500301)

① 通信作者 E-mail: renchy@iga.ac.cn

supply decreased by 1.51 billion cubic meters, the quantity of carbon storage increased by 16.79 Tg, and the area with good or higher habitat quality increased by 5 746 km², accounting for over 85.41% of the total ecological functional area. The habitat quality of biological inhabitation and activity zone was significantly improved. (3) At the regional and municipal scale, water supply and carbon storage showed a trade-off relation whereas carbon storage and habitat quality presented a synergic relation. A trade-off relation was revealed between water supply and habitat quality functions at the regional scale. At the municipal scale, there was a trade-off relation between Chifeng City and Heihe City, but a synergic relation between Great Xing'an Mountains Prefecture and Tongliao City. The results provide important data support and decision basis for regional natural resources management, ecological planning and improvement of overall benefit of ecological system.

Key words: ecosystem service function; ecological functional zone of Great Xing'an Mountains; spatio-temporal dynamics; trade-off and synergy

生态系统服务功能是生态系统形成并维持人类生存发展的环境条件,是人类活动从自然生态系统中获得的所有收益^[1-2]。生态系统类型影响着能量交换、水分循环等主要生态过程,从而改变着生态系统服务功能的提供^[3]。同时,各生态系统服务功能之间存在此消彼长的权衡作用和相互增益的协同作用,导致当人类改变服务功能以获取更大的某种特定服务功能时,影响其他类型生态系统服务功能,甚至威胁整个生态系统的稳定和安全^[4]。因此,对生态系统服务功能进行定量研究,并揭示生态系统服务功能之间的相互作用关系,有助于指导人类活动,对实现人类社会和生态系统双赢局面具有重大意义。

基于模型的生态系统服务功能评估能够实现结果的空间可视化,且在全球范围和区域尺度上均得到广泛应用。目前,国内外常用的评估模型包括 ARIES 模型、MIMES 模型、SoLVES 模型、HSI 模型和 InVEST 模型等。其中,ARIES 和 MIMES 模型目前只适用于开发地区的服务功能评估;SoLVES 模型主要用于估算生态系统服务功能社会价值;HSI 模型能综合考虑环境因子对生物多样性的影响,实现对生境质量的精准评估^[5];InVEST 模型可对多种生态系统服务功能进行空间直观的量化,并可以预测服务功能的变化趋势,其评估精度、适用性和数据易获取性较其他模型具有很大优势^[6]。采用模型评估生态系统服务功能可将复杂问题进行简化,进而全面系统地认识生态系统服务功能的本质^[7]。随着对生态系统服务功能研究的加深,其权衡协同研究逐渐成为热点。如 ONAINDIA 等^[8]、FAN 等^[9]和余玉洋等^[10]在不同地区探讨了生态系统服务功能间的作用关系,结果表明在不同空间尺度下服务功能的权衡协同关系具有差异性,从而导致利益相关者对不同服务功能的重视程度及管理策略间的权衡^[11]。生态系统服务功能只有在特定的空间尺度上才能表现其主导作用^[12],并且不同服务功能间的

关系具有高度的多样性和复杂性^[13],加强对不同空间尺度、不同服务功能的权衡协同关系研究,可为生态系统管理奠定基础并提高管理效率。

大兴安岭水源涵养与生物多样性保护重要区(简称大兴安岭生态功能区)是《全国生态功能区划》划定的 63 个全国重要生态功能区之一。该区是嫩江、额尔古纳河等诸多河流的源头,是重要水源涵养区,也是我国唯一寒温带针叶林区,还是我国重要商品粮和畜牧业生产基地的天然屏障,其丰富的生物多样性对维持区域生态平衡、调节气候等具有不可替代的作用。20 世纪末期以来,人类干扰活动的增加,导致该区域内的天然林受到较严重破坏,生态系统水源涵养、防风固沙等生态功能降低^[14],引起洪水泛滥、冻土退化等一系列生态环境问题。21 世纪初期在东北地区实施的“天然林保护工程”“退耕还林工程”等重大生态工程,使得功能区内天然林面积和蓄积量明显增加,显著提高了该区整体生态效益^[15]。但近几十年来,在人类活动和生态工程保护措施等因素影响下,该区域主要生态系统服务功能是如何变化的?各生态系统服务功能之间存在怎样的关系?在不同空间尺度上表现是否一致?上述问题鲜有研究报道。针对以上问题,亟需在该区域开展生态系统服务功能的科学评估,并深入认识不同空间尺度下生态系统服务功能之间关系的差异性。在有关大兴安岭生态系统服务功能的研究中,李为海^[16]计算并评估了草地生态系统的水源涵养、防风固沙等服务功能的价值量变化;王晓宏^[17]、岳永杰等^[18]分别评估了林地的土壤保育和水源涵养功能物质量及价值量;满卫东^[19]基于多源遥感数据估算了大兴安岭沼泽湿地的碳储量现状,并分析了影响其空间分布格局的主要因素。综上,已有研究多针对单一生态系统的服务功能开展评估,并且鲜有研究考虑不同空间尺度下服务功能的权衡协同关系问题,因此,笔者基于遥感、气象等多源数据,通过模型方法评估大兴安岭生态

功能区 2000、2010 和 2015 年水源供给、碳储存和生境质量 3 种服务功能动态变化特征,并结合相关性分析和权衡协同度模型探讨不同空间尺度下生态系统服务功能之间的权衡协同关系,为大兴安岭生态功能区生物多样性保护、生态环境保护和规划等提供科学依据。

1 研究区概况

大兴安岭生态功能区(44°~54° N,118°~127° E)位于我国黑龙江省北部和内蒙古自治区东北部(图 1),主要包括黑龙江省的黑河市、大兴安岭地区以及内蒙古自治区的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市,面积约为 29.15 万 km²。该区属寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季温凉湿润,年平均气温为 -3.5 °C,年平均降水量为 400~500 mm^[20]。主要植被类型包括兴安落叶松、樟子松、白桦、云杉等,山地连绵起伏,地势西北高、东南低,地貌为中、低山丘陵类型,平均海拔高度为 1 200~1 300 m。

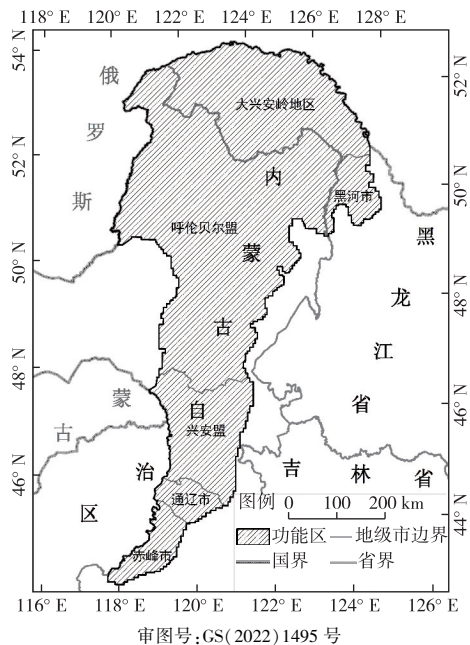


图 1 大兴安岭生态功能区地理位置示意

Fig. 1 The location of ecological function zone in Great Xing'an Mountains

2 数据来源及方法

2.1 数据来源

收集覆盖研究区的 2000、2010 和 2015 年 Landsat 系列遥感影像数据(Landsat TM/ETM+/OLI),参照 WANG 等^[21]分类方案并考虑研究区植

被类型特征,设计生态系统分类体系,包括林地、草地、耕地、湿地、建设用地和裸地 6 个一级类型,采用面向对象的遥感影像分类软件 eCognition 作为分类平台,结合分层决策树方法获得研究区 2000—2015 年 3 期生态系统类型分布数据。利用野外调查样点和高分影像验证样点对分类结果进行精度评估,分类结果总体精度高于 90%,满足研究需求。

辅助数据主要用于生态系统服务功能模型输入数据的计算,具体数据包括:

(1) 数字高程模型(digital elevation model, DEM),通过国际科学数据服务平台(<http://data-mirror.csdb.cn/>)下载 ASTER GDEM,其空间分辨率为 30 m。通过对影像进行拼接与投影转换等处理,获得覆盖整个研究区的 DEM 数据。该模型用于计算生境质量坡度影响因子。

(2) 气象数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),根据东北地区及周边 128 个气象站日尺度气温及月尺度降水数据,通过克里金插值方法获取空间连续的气温和降水数据,并利用研究区边界裁剪获得研究区日最高最低温均值及年均降水量数据,用于水源供给模型输入数据计算。

(3) 基础地理信息数据,包括道路、河流水系和行政区划等数据,数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/index.html>),比例尺为 1:25 万,用于计算生境质量水源状况等影响因子。

(4) NDVI 数据,采用 MOD13A3 的植被指数数据集,下载自 NASA/EOS LPDAAC 数据分发中心的 MODIS 产品(<https://lpdaac.usgs.gov/>),空间分辨率为 250 m,时间跨度为 2000—2015 年,用于计算生境质量食物丰富度影响因子。

(5) 土壤属性数据,来源于世界土壤数据库(<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>),经过裁剪等处理得到研究区土壤质地含量,用于计算水源供给服务中的植被可利用含水量。

2.2 生态系统服务功能评估方法

2.2.1 水源供给服务功能

利用 InVEST 模型中的产水量模块计算生态系统水源供给量,此模块是基于水量平衡原理,各栅格降水量减去实际蒸散发后的水量即得该栅格水源供给量^[22]。具体计算公式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{T_{AE,xj}}{P_x}\right) \times P_x, \quad (1)$$

$$\frac{T_{AEj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}}, \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{C_{AWx}}{P_x}, \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} o_{ETx}}{P_x}, \quad (4)$$

$$o_{ETx} = 0.0013 \times 0.408 \times A_R \times (T_{avg} + 17) \times (D_T - 0.0123P)^{0.76}, \quad (5)$$

$$C_{AWx} = \min(d_m, d_r) \times A_p, \quad (6)$$

$$A_p = 54.509 - 0.132w_s - 0.003w_s^2 - 0.055w_f^2 - 0.738w_n + 0.007w_n^2 - 2.688w_y + 0.501w_y^2. \quad (7)$$

式(1)~(7)中, Y_{xj} 为 j 类生态系统类型、栅格 x 的水源供给量, mm; T_{AEj} 为 j 类生态系统类型、栅格 x 的实际蒸散量, mm; P_x 为栅格 x 中的年降水量, mm; R_{xj} 为生态系统类型 j 、栅格 x 处的布德科干燥度指数; ω_x 为自然气候-土壤性质的非物理参数; Z 为季节降雨分布和降雨深度参数^[23], 经过多次试验校正, 选取 3.2 为研究区的 Z 值; o_{ETx} 为栅格 x 内的潜在蒸散量, mm, 利用修正的 Hargreaves 公式进行计算^[24]; A_R 为太阳大气顶层辐射, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; T_{avg} 为日最高温和最低温的均值, $^{\circ}C$; D_T 为日最高温和日最低温均值的差值, $^{\circ}C$; P 为月均降水量, mm; C_{AWx} 为植被可利用的体积含水量, mm; d_m 为土壤最大深度, mm; d_r 为植被根系深度, mm; A_p 为植被可利用含水率, 根据周文佐等^[25]的算法进行计算; w_s 为土壤砂粒含量; w_f 为土壤粉粒含量; w_n 为土壤黏粒含量; w_y 为土壤有机质含量; K_{xj} 为植被蒸散系数, 参考 FAO 提供的作物蒸散数据并结合研究区地表植被覆盖实际情况确定^[26]。具体参数取值见表 1。

表 1 生态系统类型生物物理参数

Table 1 Biophysical parameters of ecosystem types

生态系统类型	植被蒸散系数	植物根深/mm
林地	1	5 000
草地	0.6	500
耕地	0.7	300
湿地	0.9	3 000
建设用地	0.001	1
裸地	0.001	1

2.2.2 碳储存服务功能

陆地生态系统中碳储量, 一般分为地上部分碳、地下部分碳、土壤碳和死亡有机碳。以各生态系统类型作为评估单元, 应用 InVEST 模型中的碳储量模块估算生态系统碳储量, 计算公式为

$$C_i = C_{i,a} + C_{i,b} + C_{i,d} + C_{i,s}. \quad (8)$$

式(8)中, i 为某种生态系统类型; C_i 为生态系统类型 i 的碳密度, $t \cdot hm^{-2}$; $C_{i,a}$ 、 $C_{i,b}$ 、 $C_{i,d}$ 、 $C_{i,s}$ 分别为生态系统类型 i 的地上部分碳密度、地下部分碳密度、死亡有机碳密度和土壤碳密度, $t \cdot hm^{-2}$ 。

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i. \quad (9)$$

式(9)中, S_i 为生态系统类型 i 面积, hm^2 ; n 为生态系统类型数量; C 为总碳储量, t。参考王治良^[27]、包玉斌^[28]等研究并结合研究区植被类型设定碳密度参数, 具体参数取值见表 2。

表 2 碳密度参数

Table 2 Carbon density parameters

生态系统类型	地上部分碳密度	地下部分碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
林地	68.10	34.05	166.20	2.16
草地	24.34	19.55	52.25	22.70
耕地	4.70	0	33.46	0
湿地	13.66	6.49	181.94	1.05
建设用地	0	0	0	0
裸地	0	0	0	0

2.2.3 生境质量服务功能

HSI 模型由美国渔业与野生动物局于 20 世纪 80 年代初期开发, 通过构建动物与生境变量间的函数关系评价生境质量^[29], 其计算公式为

$$I_{HS} = \sum_{i=1}^n w_i f_i. \quad (10)$$

式(10)中, I_{HS} 为生境质量; n 为指标因子个数; w_i 为权重; f_i 为指标因子计算值。评价因子的选择基于环境因素对生境质量的影响方式以及气候、地形等因素对生境质量影响程度^[30]。因此, 选取对生境质量具有直接影响的生存环境控制因子, 包括水源状况(湖泊和河流密度)、干扰条件(居民地和道路密度)、遮蔽物(生态系统类型和坡度)及食物来源(NDVI)。由于每种因子对生境质量的影响程度不同, 所以需要对每个因子设置可靠的权重, 结合熵值法和层次分析法确定每个因子的权重, 可以有效避免人为主观因子干扰^[31]。各因子权重赋值结果见表 3。

2.3 权衡与协同关系分析方法

2.3.1 相关性分析

相关性分析可用于定量描述两个变量之间的线性相关程度, 以探明生态系统服务功能之间的权衡协同关系^[32]。在功能区内随机设置样点, 基于生态系统服务功能评估结果提取样点对应的水源供

给、碳储量和生境质量属性,分析各服务功能的相关性。若两种生态系统服务功能的相关系数在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平上为正,则认为两者之间存在显著的协同关系;若相关系数为负,则存在显著的权衡关系。

表3 生境质量评价因子权重

Table 3 Weights of habitat quality assessment factors

目标层	准则层		决策层	
	影响因素	权重	影响因素	权重
生境质量	水源状况	0.3	河流密度	0.35
			湖泊密度	0.65
	干扰因子	0.2	道路密度	0.45
			居民地密度	0.55
			生态系统类型	0.75
	遮蔽物条件	0.2	坡度	0.25
			NDVI	1.00
	食物丰富度	0.3		

2.3.2 权衡协同度模型

生态系统服务权衡协同度(ESTD)模型建立在数据线性拟合的基础之上,反映各个生态系统服务功能间相互作用的方向和程度^[33],目的是对研究区生态系统服务变化量的相互作用进行整体评价,具体计算公式为

$$D_{T,ij} = \frac{E_{ib} - E_{ia}}{E_{jb} - E_{ja}} \quad (11)$$

式(11)中, $D_{T,ij}$ 为第 i, j 种生态系统服务功能权衡度; E_{ia} 为 a 时刻第 i 种生态系统服务量; E_{ib} 为 b 时刻第 i 种生态系统服务量; E_{ja} 、 E_{jb} 分别为 a 、 b 时刻第 j 种生态系统服务量。 $D_{T,ij}$ 为某两种生态系统服务变化量相互作用的程度和方向, $D_{T,ij}$ 为负值时,表示第 i 与 j 种生态系统服务为权衡关系; $D_{T,ij}$ 为正值时,表示两者之间为协同关系; $D_{T,ij}$ 绝对值表示

相较于第 j 种生态系统服务功能的变化,第 i 种生态系统服务功能变化的程度。

3 结果与分析

3.1 生态系统格局及其动态变化

大兴安岭生态功能区生态系统类型分布格局见图2。林地是该功能区优势生态系统类型,其面积占功能区总面积的67%,主要分布于47°N以北地区;湿地分布于功能区的中部及北部地区;草地主要分布于功能区西部及南部地区;3种类型面积之和占功能区总面积的92%。由表4和图3可知,2000—2015年,林地、耕地和建设用地图面积增加,草地和湿地面积减少。其中,林地面积增加显著,为2080 km²;其次为耕地,面积增加466 km²;草地和湿地面积分别减少1365和1265 km²,其他生态系统类型面积变化较小。

3.2 生态系统服务功能时空动态

2000—2015年,大兴安岭生态功能区水源供给量时空动态见图4。整体上,水源供给量呈下降趋势,2000年总水源供给量为129.28亿m³,2010年增加至179.30亿m³,增长率达38.69%,2015年总水源供给量为114.18亿m³,比2000年减少15.10亿m³。2015年单位面积水源供给量比2000年减少5.19 mm·km⁻²(表5)。从空间分布变化(图5)上来看,整体上,水源供给量从西北向东南呈逐渐增加趋势,高值区主要分布于通辽市、兴安盟东部地区,低值区分布于大兴安岭及呼伦贝尔盟等地。由于该区域植被密集,地表径流受到的阻拦增大,导致区域水源供给量偏低。

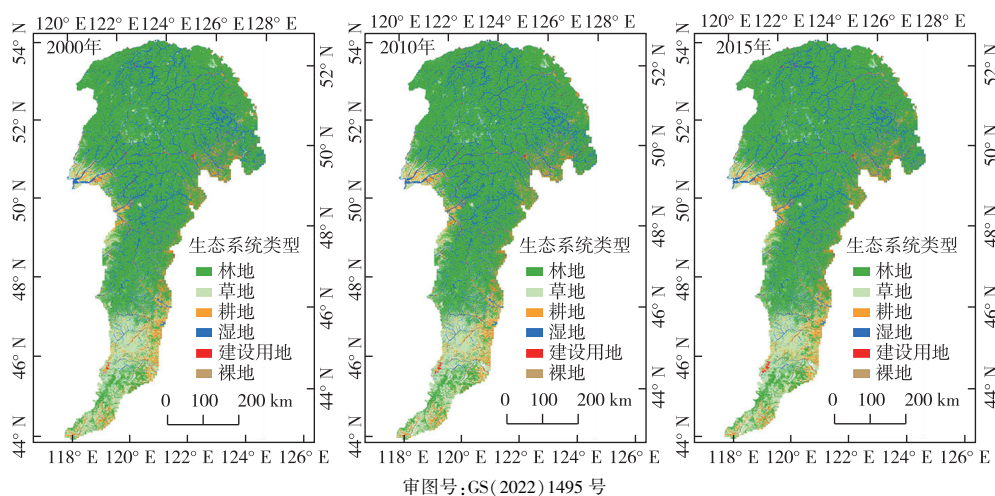


图2 2000—2015年大兴安岭生态功能区生态系统分布格局及动态

Fig. 2 The distribution and dynamics of ecosystems in Great Xing'an Mountains ecological function zone from 2000 to 2015

表 4 生态系统类型面积及其变化

Table 4 Areas of ecosystem types and their dynamics km²

类型	2000 年		2010 年		2015 年		2000—2010 年 面积变化/km ²	2010—2015 年 面积变化/km ²	2000—2015 年 面积变化/km ²
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%			
林地	195 581	67.09	196 635	67.45	197 661	67.80	1 054	1 026	2 080
草地	35 584	12.21	34 909	11.97	34 219	11.74	-675	-690	-1 365
耕地	18 554	6.36	18 562	6.37	19 020	6.52	8	458	466
湿地	38 597	13.24	38 299	13.14	37 332	12.81	-298	-967	-1 265
建设用地	2 456	0.84	2 624	0.90	2 774	0.95	168	150	318
裸地	762	0.26	504	0.17	529	0.18	-258	25	-233

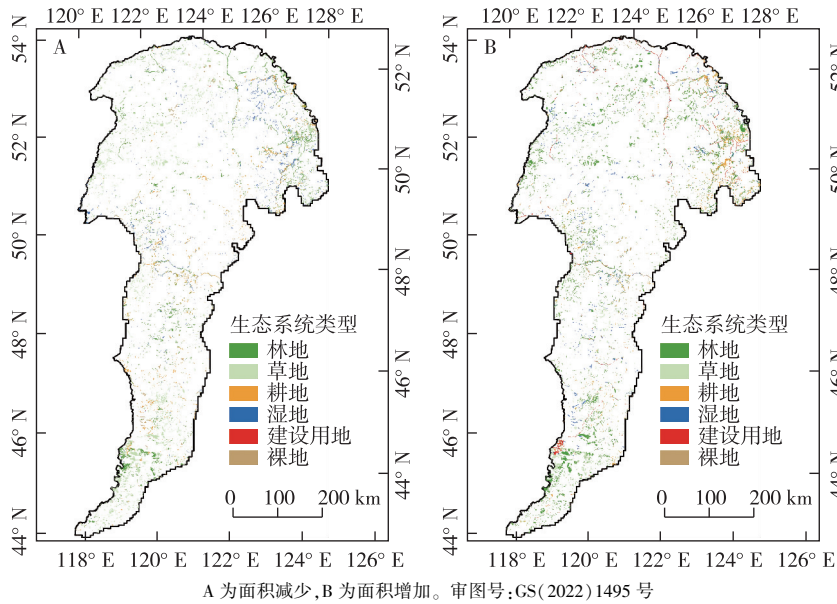


图 3 2000—2015 年生态系统类型格局变化

Fig. 3 Changes of pattern of ecosystem types from 2000 to 2015

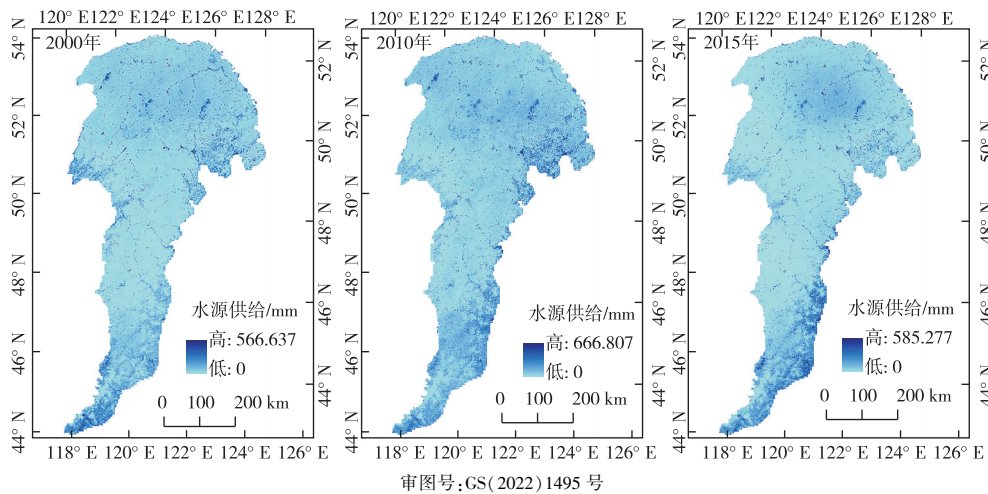


图 4 水源供给空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution of water supply

2000—2015 年大兴安岭生态功能区碳储量时空动态见图 6。其中,碳储量呈不断增加趋势,2000—2010 年碳储量增加显著,增加 13.93 Tg,

2015 年碳储量为 6 578.32 Tg,比 2000 年增加 16.79 Tg(表 5)。从空间分布变化(图 5)上来看,2000—2015 年碳储量总体分布格局无明显差异,由北至南

碳储量呈不断下降趋势,碳储量低值区基本分布在赤峰市、通辽市和兴安盟。该区域林地稀疏,固碳能力弱,导致区域内碳储量少,而碳储量高值区主要分布于大兴安岭及呼伦贝尔盟等森林植被密集区。

基于生境质量评价系统和环境因子数据集,获取大兴安岭生态功能区生境质量空间分布特征和不同质量等级面积及所占比例。根据自然断点法将生境质量分为最好、良好、一般和差4个等级。由图7可知,功能区内生境质量最好的区域与林地、湿地空间分布较为一致,主要分布于呼伦贝尔盟及大兴安岭东北地区;良好区域主要分布在黑河市及大兴安岭西北地区;质量一般和差区域主要分布在赤峰市、通辽市及兴安盟。该地区主要生态系统类型为建设用地,其遮蔽条件和NDVI值都较低。生境质量等级面积及其占比见表6,2000—2015年,功能

区生境质量最好和差区域的面积变化较大,其中,质量最好区域面积呈增加趋势,增加6 746 km²,质量差区域面积大幅减少,减少7 625 km²。2015年良好及以上生境质量面积增加5 746 km²,占生态功能区总面积的85.41%,表明2000—2015年间大兴安岭生态功能区生境质量改善显著。

表5 水源供给量和碳储量变化

Table 5 Dynamics of water supply and carbon storage

时间	总水源供给量/ 亿 m ³	单位面积水源供给 量/(mm · km ⁻²)	碳储量/ Tg
2000年	129.28	44.35	6 561.53
2010年	179.30	61.50	6 575.46
2015年	114.18	39.16	6 578.32
2000—2010年	50.02	17.15	13.93
2010—2015年	-65.12	-22.34	2.86
2000—2015年	-15.10	-5.19	16.79

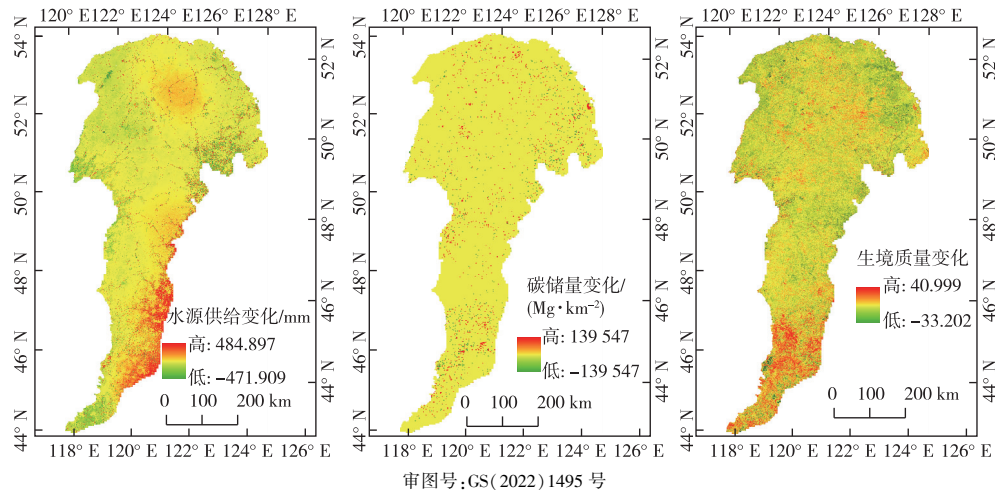


图5 2000—2015年生态系统服务功能空间变化分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecosystem service functions from 2000 to 2015

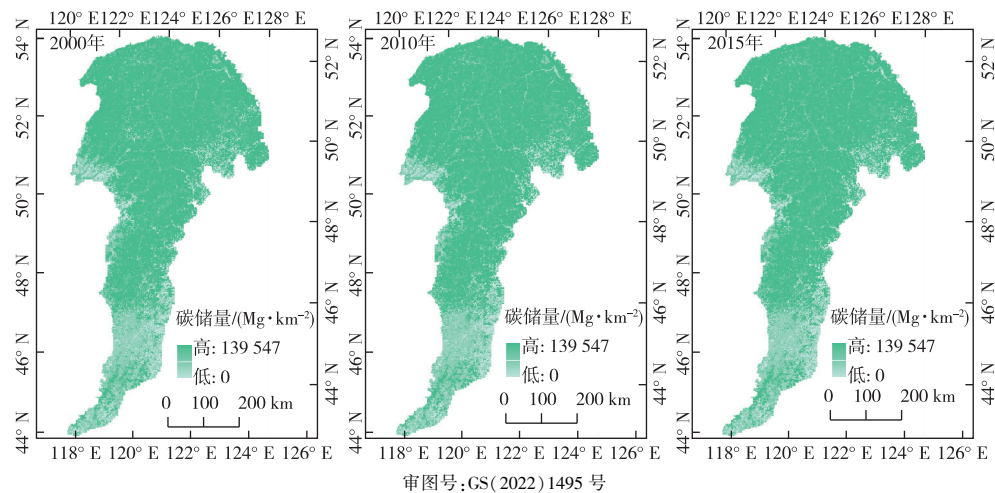


图6 碳储量空间分布格局

Fig. 6 Spatial distribution of carbon storage

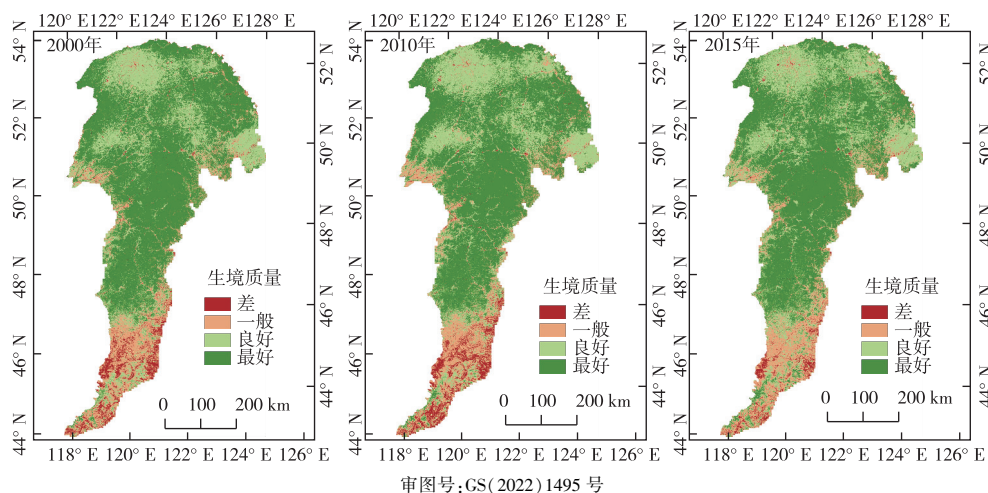


图7 生境质量空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution of habitat quality

表6 生境质量等级面积及其占比

Table 6 Area and percentage of different habitat quality grades

年份	最好		良好		一般		差	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
2000	159 628	54.77	83 543	28.67	28 083	9.64	20 178	6.92
2010	164 143	56.32	78 168	26.82	28 643	9.83	20 490	7.03
2015	166 374	57.09	82 543	28.32	29 974	10.28	12 553	4.31

3.3 生态系统服务功能权衡协同

为消除各服务功能之间不同量纲的影响,先对数据进行标准化处理,并对水源供给、碳储存和生境质量进行相关性分析,结果见图8。图8中,对角线上是3种服务功能的直方图及核密度曲线,对角线以上是相关系数及显著性结果,对角线以下是各服务功能的散点图及平滑拟合曲线。2000—2015年3种生态系统服务功能相关系数变化保持一致。其中,水源供给与碳储存、水源供给与生境质量之间呈显著负相关($P < 0.001$),说明两者呈权衡关系,且权衡作用在不断加强。而碳储存与生境质量之间呈显著正相关($P < 0.001$),说明两者呈较强的协同关系。

为探究不同空间尺度下服务功能作用关系的差异性,根据ESTD模型计算研究区2000—2015年3种生态系统服务功能间的权衡协同度,并统计各地区各服务功能之间权衡协同关系面积占比,结果见表7。水源供给和碳储存关系中,赤峰市、大兴安岭地区、通辽市和黑河市权衡关系面积占比更大,其他地区权衡与协同面积差别不显著。水源供给与生境质量权衡协同关系较为复杂,其中,赤峰市、黑河市和呼伦贝尔盟权衡关系占主导地位,大兴安岭、通辽市和兴安盟协同关系占比更大。碳储存与

生境质量关系中,赤峰市、通辽市和大兴安岭地区主要呈协同关系,其他区域权衡与协同面积差异不明显。

4 讨论

4.1 生态系统服务功能时空变化分析

全面系统地评估生态系统服务功能可为大兴安岭生态功能区生态环境保护与可持续发展提供科学决策支持。研究发现功能区内水源供给量呈现先增加后减少趋势,这种变化趋势在很大程度上与该地区降水量变化有关^[34],2010年降水日数及降水量远多于2000年^[35]。2010年以后,林地面积持续增加,湿地面积显著减少,导致该区域植被的蒸散发量增加,从而造成水源供给服务功能显著降低。这与MAO等^[36]研究结果基本一致。

与2000年相比,2015年碳储存服务功能变化不大,但仍呈逐年增长趋势。虽然湿地和草地面积减少导致固碳能力有所减弱,但自国家实施“退耕还林还草”“三北防护林”“天然林保护”等多项生态工程以来,林地面积逐年增加,从而提高了生态系统碳储量和固碳速率^[37],因此,研究区碳储存服务功能有所增强。这与张煜星等^[38]对东北地区的碳储量估算结果基本保持一致。

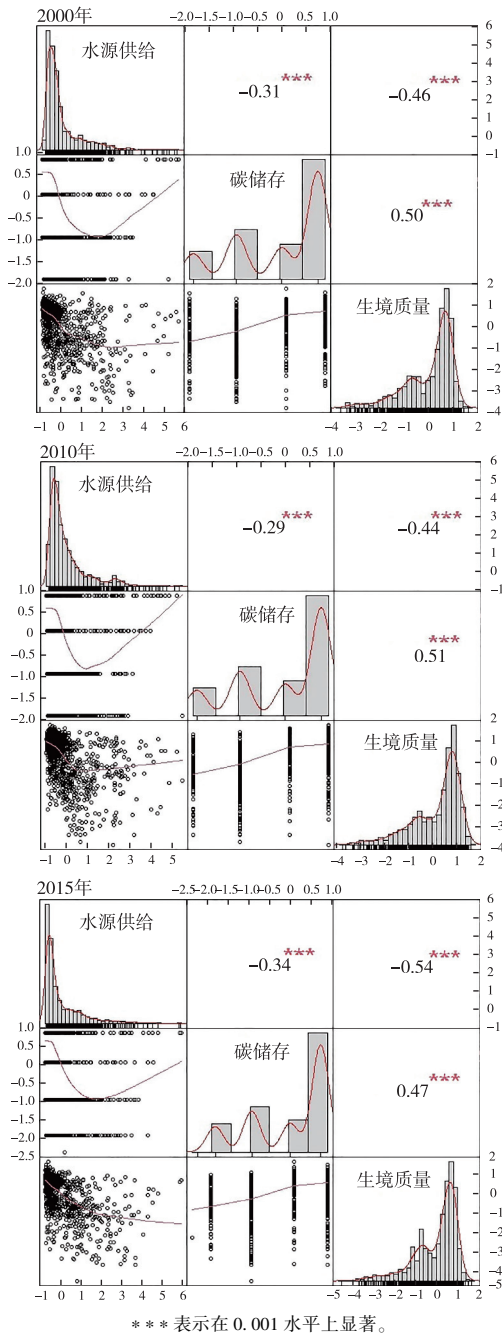


图8 生态系统服务功能间的相关关系

Fig. 8 Correlation between ecosystem service functions

2000—2015 年大兴安岭生态功能区生境质量

有所改善。该区域实施的国家生态工程使得自然植被不断恢复,减少了人类活动对功能区生态环境的干扰,生境质量明显改善。从空间上看,生境质量最好区域主要分布在功能区中部和北部,该区域森林覆盖率较高,食物量充足,水系丰富,气候适宜,受人类活动影响较小,非常有利于生物的生长繁衍;南部生境较差区域受人类活动干扰较大,食物量匮乏,表面植被覆盖率很低,遮蔽条件很差,生物抗击外来干扰能力很弱,水源也相对缺少,不利于生物生存,因此,建议加强该地区生态环境保护力度。

4.2 生态系统服务功能权衡协同关系分析

采用相关性分析和权衡协同度模型分别探讨区域尺度和地级市尺度下生态系统服务功能的相互作用关系。采用相关性分析衡量长时间范围内区域尺度上变量间的相关关系,而权衡协同度模型是在特定时间范围内地级市尺度上对权衡协同关系进行量化表达。结果表明,两种方法均能用于直观准确地表达生态系统服务功能之间的关系,且研究结果较为一致。除个别地区生态系统服务功能的权衡协同关系存在差异性以外,综合来看,研究区内水源供给-碳储存、水源供给-生境质量呈权衡关系,碳储存-生境质量呈协同关系。

在区域尺度上,林地面积增加显著,导致植被蒸散作用加强,以及受降水量波动变化影响,导致水源供给量减少;而林地面积增加也表示植被覆盖率增加,从而增强生态系统碳储存服务功能。因此,水源供给-碳储存呈权衡关系。生态工程的实施使得自然植被得到保护与恢复,生境质量改善显著,并且植被覆盖率的增加也意味着碳储量增加。因此,碳储存-生境质量呈协同关系。研究区生境质量显著提高,水源供给服务功能减弱,主要是由于生态工程的实施使得林地面积增加显著,生境质量良好及以上区域分布范围与林地分布范围基本一致,但林地面积增加导致水源供给量减少。因此,水源供给-生境质量呈权衡关系。

表7 各地区权衡协同关系面积占比

Table 7 Percentage of areas of trade-off relation and synergy relation in each region

地区	水源供给-碳储存		水源供给-生境质量		碳储存-生境质量	
	协同占比/%	权衡占比/%	协同占比/%	权衡占比/%	协同占比/%	权衡占比/%
赤峰市	32.93	67.07	31.66	68.34	67.53	32.47
大兴安岭地区	44.42	55.58	60.96	39.04	59.31	40.69
呼伦贝尔盟	48.23	51.77	46.61	53.39	49.94	50.06
兴安盟	52.65	47.35	55.40	44.60	50.88	49.12
通辽市	37.98	62.02	66.05	33.95	62.99	37.01
黑河市	46.02	53.98	43.24	56.76	48.28	51.72

高敏^[39]分析了水源供给与生境质量相互作用关系的影响因素,结果表明,建设用地及林地面积的增加会增强其权衡关系。笔者研究中生态系统类型面积变化结果表明,2000—2015年间林地和建设用地面积增加,也进一步说明水源供给与生境质量表现为此消彼长的权衡关系,这与张静静^[40]对伏牛山地区生态系统服务功能权衡协同研究结果相一致。

在地级市尺度上,水源供给与碳储存之间主要呈权衡关系,以赤峰市、通辽市和黑河市为例,上述地区森林覆盖率偏低,碳储量低,主要生态系统类型为草地、耕地及建设用地,降雨后易形成地表径流,加上城镇等不透水层的增加,均促进了区域总水源供给量^[41],因此,水源供给-碳储存中权衡关系占主导地位,上述结论与学者在陕北^[42]及黄土高原^[43]的研究结果基本一致。水源供给与生境质量权衡协同关系较为复杂,其中,赤峰市和黑河市权衡关系占主导地位,大兴安岭和通辽市协同关系占比更大。具体而言,虽然赤峰市2015年单位面积水源供给量相比2000年有所减弱,但生境质量逐步改善。黑河市与赤峰市相反,有部分生境质量最好区域转化为良好区域,因此,赤峰市和黑河市水源供给与生境质量为权衡关系。大兴安岭地区水源供给量减少,良好生境质量区域面积的增加由生境质量最好区域转化而来,表现为共同下降的协同作用。通辽市生境质量差的区域逐渐减少,转变为一般及良好等级,表现为共同促进的协同作用。碳储存与生境质量表现为协同关系,以赤峰市、通辽市和大兴安岭地区为例,赤峰市和通辽市地处研究区南部,植被覆盖率低,生境质量虽有所改善,但仍为低值区,因此,该地区碳储存与生境质量表现为消极的协同作用。大兴安岭地区林地面积大幅增加,该地区植被覆盖率上升、碳储量增加,并且植被覆盖率高是衡量生境质量优劣的重要指标^[44],虽然最好生境质量区域面积有所减少,但整体生境质量仍为高值区,因此,碳储存与生境质量呈协同关系。

所采用的InVEST模型虽然在生态系统服务物质量模拟方面被众多学者认可并广泛采用,但是该模型存在一定的局限性。例如,InVEST模型的碳储量估算模块对碳循环过程进行了过度简化,也无法获取不同碳库之间流动信息^[45]。其次,该研究仅考虑区域尺度和地级市尺度上的差异性,还应将景观、样方/样地等尺度纳入探讨范围。此外,生态系统服务功能是生态系统维持人类生存的重要条件,但也会受到人地关系的影响,尤其是城镇化等因素

的胁迫压力。因此,将全球气候变化、人类胁迫等因素纳入系统结构并解析其变化状况,是下一步研究的重点。

5 结论

基于多源数据和InVEST等模型,评估大兴安岭功能区生态系统格局、生态系统服务功能变化及其在不同空间尺度上的权衡协同关系。主要结论如下:

(1)大兴安岭生态功能区生态系统类型分布格局以林地为主,湿地和草地次之,耕地、建设用地和裸地面积较小。2000—2015年,研究区生态系统类型整体呈现“三增三减”的变化趋势,林地面积显著增加,建设用地和耕地略有增加,湿地、草地和裸地面积减少。

(2)受降水量波动变化、林地和湿地面积变化导致植被蒸散发量增加等因素影响,水源供给服务功能明显减弱;林地面积显著增加导致碳储存服务功能有所增强,但年际变化不明显,高值区基本分布于植被密集区;生态工程的实施使得自然植被得到保护与恢复,生境质量改善显著。

(3)在区域和地级市尺度上,水源供给与碳储存呈权衡关系,碳储存与生境质量呈协同关系。水源供给与生境质量在区域尺度上表现为权衡关系,但在地级市尺度上赤峰市和黑河市表现为权衡关系,大兴安岭和通辽市表现为协同关系。不同空间尺度上的权衡协同关系分析结果可为制定适应区域生态安全与可持续发展的最优决策提供科学依据,实现整体生态系统服务惠益的最大化。

参考文献:

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, *et al.* The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] ABERNETHY V D. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [J]. *Population and Environment*, 1999, 20(3): 277-278.
- [3] WAINGER L A, KING D M, MACK R N, *et al.* Can the Concept of Ecosystem Services Be Practically Applied to Improve Natural Resource Management Decisions? [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 978-987.
- [4] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, *et al.* Global Consequences of Land Use [J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [5] 满卫东, 刘明月, 王宗明, 等. 1990—2015年三江平原生态功能区水禽栖息地适宜性动态 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 4083-4091. [MAN Wei-dong, LIU Ming-yue, WANG Zong-ming, *et al.* Dynamics of Habitat Suitability for Waterfowls from 1990 to

- 2015 in the Ecological Function Zone of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (12): 4083-4091.]
- [6] BABBAR D, AREENDRAN G, SAHANA M, *et al.* Assessment and Prediction of Carbon Sequestration Using Markov Chain and InVEST Model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123333.
- [7] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2012, 33(3): 41-47. [YANG Yuan-yuan, DAI Er-fu, FU Hua. The Assessment Framework of Ecosystem Service Value Based on InVEST Model [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 41-47.]
- [8] ONAINDIA M, DE MANUEL B F, MADARIAGA I, *et al.* Co-benefits and Trade-offs between Biodiversity, Carbon Storage and Water Flow Regulation [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 1-9.
- [9] FAN F, LIANG C Z, TANG Y K, *et al.* Effects and Relationships of Grazing Intensity on Multiple Ecosystem Services in the Inner Mongolian Steppe [J]. Science of the Total Environment, 2019, 675: 642-650.
- [10] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达 [J]. 生态学报, 2020, 40 (16): 5465-5477. [YU Yu-yang, LI Jing, ZHOU Zi-xiang, *et al.* Multi-scale Representation of Trade-offs and Synergistic Relationship among Ecosystem Services in Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5465-5477.]
- [11] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析 [J]. 地理学报, 2020, 75 (5): 975-988. [ZHANG Jing-jing, ZHU Wen-bo, ZHU Lian-qi, *et al.* Multi-scale Analysis of Trade-off/Synergy Effects of Forest Ecosystem Services in the Funiu Mountain Region [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 975-988.]
- [12] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的尺度特征 [J]. 生态学报, 2007, 26 (9): 1432-1437. [ZHANG Hong-feng, OUYANG Zhi-yun, ZHENG Hua. Spatial Scale Characteristics of Ecosystem Services [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (9): 1432-1437.]
- [13] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法 [J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9. [FU Bo-jie, YU Dan-dan. Trade-off Analyses and Synthetic Integrated Method of Multiple Ecosystem Services [J]. Resources Science, 2016, 38(1): 1-9.]
- [14] 常艳. 内蒙古大兴安岭森林生态系统的服务功能及价值评价 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010. [CHANG Yan. The Evaluation on Forest Ecosystem Service Value of Daxing'anling Forest in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.]
- [15] 相恒星, 王宗明, 毛德华. 东北地区天然林资源保护工程生态保护成效分析 [J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(3): 314-322. [XIANG Heng-xing, WANG Zong-ming, MAO De-hua. Ecological Effect of Natural Forest Protection Project in Northeast China [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(3): 314-322.]
- [16] 李为海. 大兴安岭草地生态系统服务功能的评价 [J]. 中国林副特产, 2007(1): 77-80.
- [17] 王晓宏. 内蒙古大兴安岭森林生态系统生态服务功能评估 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [WANG Xiao-hong. Study on Forest Ecosystem Services of Daxing'anling Forest in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.]
- [18] 岳永杰, 韩军, 李玉柱, 等. 内蒙古大兴安岭森林涵养水源和保育土壤功能评估 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(12): 91-95. [YUE Yong-jie, HAN Jun, LI Yu-zhu, *et al.* Functional Assessment of Water Conservation and Soil Conservation of Forest Services in Daxing'anling Mountains of Inner Mongolia [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(12): 91-95.]
- [19] 满卫东. 基于遥感和实测数据的大兴安岭沼泽湿地碳储量估算研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2018. [MAN Wei-dong. Estimating Wetland Organic Carbon Storage in the Greater Khingan Mountains Based on Remote Sensing and Measured Data [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [20] 段亮亮. 大兴安岭气候、森林覆盖率和冻土变化对河川径流的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017. [DUAN Liang-liang. Impacts of Changes in Climate, Forest Cover and Permafrost on Streamflow in the Da Hinggan Mountains Watersheds [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.]
- [21] WANG Z M, MAO D H, LI L, *et al.* Quantifying Changes in Multiple Ecosystem Services during 1992-2012 in the Sanjiang Plain of China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 514: 119-130.
- [22] WU X T, WANG S, FU B J, *et al.* Land Use Optimization Based on Ecosystem Service Assessment: A Case Study in the Yanhe Watershed [J]. Land Use Policy, 2018, 72: 303-312.
- [23] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [24] 孙兴齐. 基于 InVEST 模型的香格里拉市生态系统服务功能评估 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2017. [SUN Xing-qi. Evaluation of Ecosystem Services in Shangri-La Based on InVEST Model [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2017.]
- [25] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究: 以东北黑土为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95. [ZHOU Wen-zuo, LIU Gao-huan, PAN Jian-jun. Soil Available Water Capacity and Its Empirical and Statistical Models: With a Special Reference to Black Soils in Northeast China [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2003, 17(4): 88-95.]
- [26] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局 [J]. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797. [FU Bin, XU Pei, WANG Yu-kuan, *et al.* Spatial Pattern of Water Retention in Dujiangyan County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 789-797.]
- [27] 王治良. 嫩江流域湿地自然保护区空缺 (GAP) 分析 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (东北地理与农业生态研究所), 2016. [WANG Zhi-liang. GAP Analysis of Wetland Nature Reserve in

- Nenjiang River Basin, Northeast China [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [28] 包玉斌. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究 [D]. 西安: 西北大学, 2015. [BAO Yu-bin. Temporal and Spatial Change of Ecological Services on Loess Plateau of Shaanxi by InVEST Model [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.]
- [29] 孟庆林, 李明玉, 任春颖, 等. 基于 HSI 模型的吉林省东部地区生境质量动态评价 [J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 140-147. [MENG Qing-lin, LI Ming-yu, REN Chun-ying, et al. Dynamic Assessment of Habitat Quality in Eastern Jilin Province Based on HSI Model [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 140-147.]
- [30] 董张玉, 刘殿伟, 王宗明, 等. 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价 [J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1503-1511. [DONG Zhang-yu, LIU Dian-wei, WANG Zong-ming, et al. Assessment of the Habitat Suitability for Waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and Remote Sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1503-1511.]
- [31] TANG X G, LI H P, XU X B, et al. Changing Land Use and Its Impact on the Habitat Suitability for Wintering Anseriformes in China's Poyang Lake Region [J]. Science of the Total Environment, 2016, 557/558: 296-306.
- [32] LI Ting, LÜ Yi-he, FU Bo-jie, et al. Bundling Ecosystem Services for Detecting Their Interactions Driven by Large-scale Vegetation Restoration: Enhanced Services while Depressed Synergies [J]. Ecological Indicators, 2019, 99: 332-342.
- [33] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析: 以银川盆地为例 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1731-1738. [LI Hong-jian, REN Zhi-yuan, LIU Yan-xu, et al. Tradeoffs-synergies Analysis among Ecosystem Services in Northwestern Valley Basin: Taking Yinchuan Basin as an Example [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1731-1738.]
- [34] 边玉明, 代海燕, 王冰, 等. 内蒙古大兴安岭林区年降水量变化特征及周期分析 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 146-150. [BIAN Yu-ming, DAI Hai-yan, WANG Bing, et al. Spatiotemporal Distribution and Periodicity of Annual Precipitation in Daxing'anling Forest Region of Inner Mongolia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 146-150.]
- [35] 王冰, 边玉明, 张秋良, 等. 近 45 年内蒙古大兴安岭林区不同等级降水变化特征 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3235-3242. [WANG Bing, BIAN Yu-ming, ZHANG Qiu-liang, et al. Dynamic Characteristics of Different Grade Precipitation Events during Past 45 Years in Daxing'anling Forest Region, Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3235-3242.]
- [36] MAO De-hua, HE Xing-yuan, WANG Zong-ming, et al. Diverse Policies Leading to Contrasting Impacts on Land Cover and Ecosystem Services in Northeast China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 117961.
- [37] 冯源, 肖文发, 朱建华, 等. 造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 281-290. [FENG Yuan, XIAO Wen-fa, ZHU Jian-hua, et al. Impacts of Afforestation on the Carbon Stocks and Carbon Sequestration Rates of Regional Forest Ecosystems [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(3): 281-290.]
- [38] 张煜星, 王雪军, 蒲莹, 等. 1949—2018 年中国森林资源碳储量变化研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14. [ZHANG Yu-xing, WANG Xue-jun, PU Ying, et al. Changes in Forest Resource Carbon Storage in China between 1949 and 2018 [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 1-14.]
- [39] 高敏. 成渝城市群生态系统服务时空变化研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020. [GAO Min. Spatiotemporal Changes of Ecosystem Services in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
- [40] 张静静. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡研究 [D]. 开封: 河南大学, 2019. [ZHANG Jing-jing. Quantification of Tradeoffs on Forest Ecosystem Services in Mount Funiu Region [D]. Kaifeng: Henan University, 2019.]
- [41] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. 不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟 [J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 9-13. [WU Zhe, CHEN Xin, LIU Bei-bei, et al. Simulation of Spatial Distribution of Water Yield of Hainan Island with Different Types of Land Use/Land Cover [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 9-13.]
- [42] JIA Xiao-qing, FU Bo-jie, FENG Xiao-ming, et al. The Tradeoff and Synergy between Ecosystem Services in the Grain-for-green Areas in Northern Shaanxi, China [J]. Ecological Indicators, 2014, 43: 103-113.
- [43] WANG Cong, WANG Shuai, FU Bo-jie, et al. Precipitation Gradient Determines the Tradeoff between Soil Moisture and Soil Organic Carbon, Total Nitrogen, and Species Richness in the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1538-1545.
- [44] 陈涛, 徐瑶. 基于 RS 和 GIS 的四川生态环境质量评价 [J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 153-157. [CHEN Tao, XU Yao. Eco-environmental Synthetic Analyses Based on RS and GIS Technology in Sichuan Province [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2006, 27(2): 153-157.]
- [45] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367. [HUANG Cong-hong, YANG Jun, ZHANG Wen-juan. Development of Ecosystem Services Evaluation Models: Research Progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360-3367.]

作者简介: 刘华超 (1997—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 从事植被遥感方面的研究。E-mail: liuhuachao@iga.ac.cn

(责任编辑: 李祥敏)