

DOI: 10.20103/j.stxb.202304170788

王鹤潭, 巩贺, 黄玫, 张远东, 孙玮, 顾峰雪. 量化气候和土地利用变化对生态资产变化的相对贡献——以房山区为例. 生态学报, 2024, 44(8): 3213-3222.

Wang H T, Gong H, Huang M, Zhang Y D, Sun W, Gu F X. Quantifying relative contribution of climate change and land use change to the change of ecological assets: taking Fangshan District as an example. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3213-3222.

量化气候和土地利用变化对生态资产变化的相对贡献 ——以房山区为例

王鹤潭¹, 巩 贺², 黄 玫², 张远东³, 孙 玮¹, 顾峰雪^{1,*}

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081

2 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

3 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘要:生态资产与人类福祉密切相关,开展生态资产评估并定量区分气候和人类活动对生态资产变化的相对贡献,对于评估区域生态文明建设成效、生态补偿、干部离任的自然资产审计等均具有重要意义。在单位面积价值当量因子方法的基础上,重新定义了标准生态服务价值当量因子,并构建了一个能够定量区分气候变化和土地利用变化对生态资产变化相对贡献的方法,以北京市房山区为例,分析了 2000 年至 2019 年房山区生态资产的变化,以及气候变化和土地利用变化对生态资产变化的相对贡献,结果表明:(1)房山区 2019 年生态资产总价值 177.14 亿元。森林、草地、农田和湿地的生态资产分别占生态资产总价值的 82.33%、11.76%、5.25% 和 0.095%。(2)房山在 2000—2019 年期间,生态资产总价值增加了 2.275 亿元,气候变化使得房山区的生态资产总价值增加了 2.689 亿元,而土地利用变化使得生态资产总价值减少了 0.414 亿元。(3)房山区生态资产西高东低,其中霞云岭乡生态资产总价值最高;琉璃河镇的生态资产增加最多,而拱辰街道下降最显著。过去 20 年是房山区社会经济快速发展的时期,由于气候变化和生态保护与修复使得生态资产增加,抵消了由于建设用地扩张所带来的生态资产损失。

关键词:生态资产;气候变化;土地利用变化;相对贡献

Quantifying relative contribution of climate change and land use change to the change of ecological assets: taking Fangshan District as an example

WANG Hetan¹, GONG He², HUANG Mei², ZHANG Yuandong³, SUN Wei¹, GU Fengxue^{1,*}

1 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: As an ecological asset, ecosystem is closely related to human welfare. It is of great significance to evaluate the value of ecological assets and quantitatively distinguish the relative contribution of human activities to the change of ecological assets for assessing the effectiveness of regional ecological civilization construction, ecological compensation, and natural asset audit of cadres leaving office. Based on the method of equivalent value factor per unit ecosystem area, this study redefined the standard ecological assets value equivalent factor, and constructed a method that could quantitatively distinguish the relative contribution of climate change and land use change to the value change of ecological assets. Taking

基金项目:美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23100202);中国农业科学院科技创新工程项目

收稿日期:2023-04-17; 网络出版日期:2024-01-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gufengxue@caas.cn

Fangshan District of Beijing as an example, this study analyzed the change of ecological assets in Fangshan District from 2000 to 2019, and the relative contribution of climate change and land use change to the change of ecological assets. The results showed that: (1) the total value of ecological assets in Fangshan District in 2019 was 17.714 billion CNY. The value of ecological assets of forest, grassland, farmland and wetland respectively accounted for 82.33%, 11.76%, 5.25% and 0.095% of the total value of ecological assets, respectively. (2) From 2000 to 2019, the total value of ecological assets in Fangshan District increased by 2.275 billion CNY. Climate change increased the total value of ecological assets by 2.689 billion CNY, while land use change reduced the total value of ecological assets by 0.414 billion CNY. (3) The value of ecological assets in Fangshan District was high in the west and low in the east, of which the total value of ecological assets in Xiayunling Township was the highest. The ecological assets in Liulihe Township increased the most, while Gongchen Street decreased the most significantly. The past 20 years have been a period of rapid social and economic development in Fangshan District. Due to climate change and ecological protection and restoration, the value of ecological assets has increased, offsetting the loss of ecological assets value caused by the expansion of construction land.

Key Words: ecological asset; climate change; land use change; relative contribution

量化评估“绿水青山”的经济价值,是生态文明建设的重要组成部分,是推进生态文明制度体系建设的重要手段,是引导各级政府积极践行生态文明的有力措施。生态资产是指能为人类提供各种产品和服务的生态资源和环境^[1-2],包括各类自然和人工生态系统^[1]。生态资产的评估包括了作为载体的水、土地和生物的价值和生态系统服务价值的评估^[1-2],自 20 世纪 90 年代生态系统服务价值的评估研究逐渐增多^[3-4]。对生态系统服务价值的定量评估可以分为基于单位生态服务产品价格的计算方法和基于单位面积价值当量因子的方法。基于单位生态服务产品价格的计算方法在全球均有广泛的应用,欧阳志云等^[5]首次提出了生态系统生产总值(GEP)的概念,建立了 GEP 核算的方法体系。此后,基于该方法体系在不同尺度对不同类型生态系统开展了大量的 GEP 核算工作^[1,6-12]。基于单位面积价值当量因子的方法由 Costanza 于 1997 年提出,并评估了全球生态系统服务和自然资源的经济价值^[13]。谢高地等^[14-15]在该方法的基础上,将生态系统生态服务价值当量因子,定义为 1hm² 农田每年自然粮食产量的经济价值,并对生态系统服务价值的当量因子进行了进一步修订和补充,成功应用于中国区域不同生态系统服务价值的评估^[14-18]。由于碳元素是构成生命的基础,陆地生态系统固定碳元素的多少决定了地球生命支持系统功能的大小,直接和间接决定了人类福祉。生态系统的各类服务功能,尤其是支持服务也与生态系统总有机碳库的形成、积累密切相关。因此,本研究将单位面积上总有机碳库碳资产的价值作为生态系统生态服务价值当量因子,相比将农田单位粮食产量的经济价值,能够更加充分的反应生态系统的供给服务能力,以及与调节服务、支付服务和文化服务之间的连接关系。

生态资产的变化是自然和人为因素共同驱动的结果,在干部任期考核的自然资源和生态环境审计、生态文明建设评估等生态资产变化评估中,定量区分自然和人为因素的相对贡献至关重要。已有生态系统服务价值的核算数据主要来源于监测和统计,无法定量区分气候变化和土地利用变化在生态系统服务价值中的贡献率^[19-27]。因此,本研究在生态资产核算的基础上,构建了一个量化气候和土地利用变化对生态资产变化相对贡献的方法,为评估人类活动对生态资产变化的影响提供了技术支撑。

房山区定位为首都可持续发展的战略新区和现代化国际大都市的重要发展区,同时还是北京市西南部重要的生态屏障。20 世纪 80 年代后,房山区实施封山育林,禁止乱砍滥伐,大规模植树造林,改善生态环境,使得林地面积逐步扩大。2000 年后北京城市化进程加速,房山区的建设用地也急剧增加,仅 10 年就翻了几乎 1 倍^[28]。因此,本研究以房山区为例,利用新建的生态资产核算方法体系,评估了 2000—2019 年房山区生态资产的时空变异,定量辨识了气候变化和人类活动对房山区过去 20 年生态资产变化的相对贡献,从而为区域的干部离任生态环境审计、生态工程建设的生态效益评估、生态补偿等提供了技术和数据支撑,同时也为区域的生态系统保护与管理提供参考。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域概况

房山区(北纬 39°30′—39°55′,东经 115°25′—116°15′)位于北京市的西南部,辖区总面积 2019km²。气候属北温带大陆性季风气候,地处暖温带半湿润区,年平均气温 10—12℃,多年平均降水量为 655mm。房山区地处太行山脉与华北平原的过渡地带,地貌类型复杂多样,由西北向东南依次为中山、低山、丘陵、岗台地、洪积平原和冲积平原,山地和丘陵的面积占总面积的三分之二(图 1)。基于 2015 年遥感影像解译的土地利用数据表明(图 1),房山区的土地利用随地势而变化,在西部中山、低山、丘陵区以森林、草地和灌丛为主,其中森林面积最大,占总面积的 53.8%,草地占到 11.69%。在东部和南部的洪积平原和冲积平原,以农田和建设用地为主。

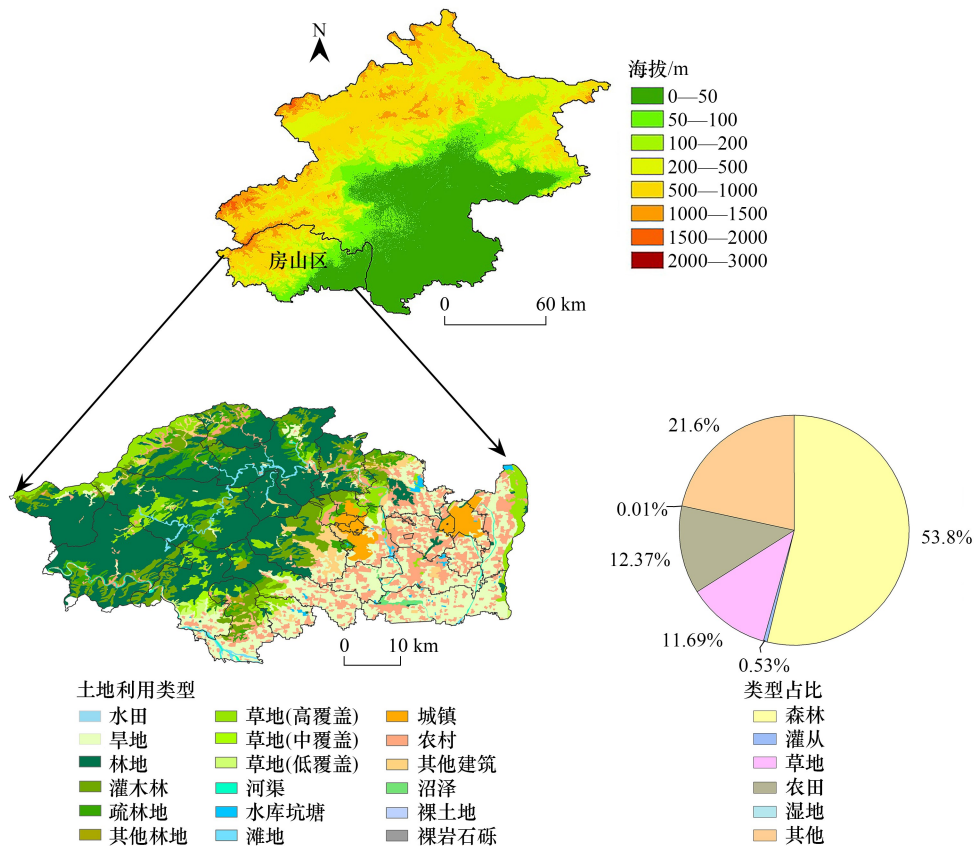


图 1 房山位置图、土地利用空间分布及各土地利用类型占比

Fig.1 The location of Fangshan District, spatial distribution of land use and the proportion of each land use type in Fangshan District

1.2 生态资产评估方法和参数确定

本研究将生态系统生态服务价值当量因子定义为单位面积上总有机碳库碳资产的价值,然后应用改进的谢高地等^[14—15]的生态系统生态服务价值当量因子表,核算出区域的生态资产总价值。生态资产总价值分为直接价值和间接价值两部分,生态资产的价值(EWD)为供给服务价值,用生态系统碳资产的价值表示,计算方法为:

$$EWD = \sum_{i=1}^n A_i \times [(VC_i + SC_i) \times P_c] \quad (1)$$

在进行区域生态资产评估时,根据不同空间分辨率将区域划分成若干格点, n 为评估区的格点数, A_i 为第 i 个格点的面积(hm²), VC_i 为第 i 个格点的植被碳储量(tCO₂/hm²), SC_i 为第 i 个格点的土壤有机碳储量

(tCO_2/hm^2), P_c 为自愿减排碳市场多年平均的碳交易价格, 根据研究时段内国际碳抵消价格的均值取值为 13.6 元/ t CO_2 。

生态资产间接价值包括调节服务、支持服务和文化服务的价值, 各项通过直接价值和当量因子表转换得到, 间接价值(EWI)的计算方法为:

$$EWI = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^7 A_i \times [(VC_i + SC_i) P_c \times R_{ij}] \quad (2)$$

式中, R_{ij} 为间接价值与直接价值的转换系数。 $j=1, 7$, 分别代表生态系统的气体调节服务、气候调节服务、水源涵养服务、土壤形成与保护服务、废物处理服务、生物多样性维持和娱乐文化服务。 R_{ij} 取值在谢高地等^[14-15]的当量因子表的基础上做了进一步的改进: (1) 不同类型生态系统碳资产价值具有同等重要性; (2) 在本研究中的当量因子反应的是各类生态系统服务价值相对于碳资产价值的重要性, 因此本研究在谢高地等^[14-15]的基础上做了适当调整, 取值见表 1。

表 1 单位面积生态资产当量

Table 1 Ecological assets equivalent value per unit area

评价指标 Evaluation indexes	森林 Forest	草地 Grassland	农田 Cropland	湿地 Wetland	水域 Water bodies	荒漠 Desert
气体调节 Gas regulation	1.90	1.31	0.52	4.02	0.58	0.10
气候调节 Climate regulation	5.23	1.97	0.70	12.58	2.34	0.17
水源涵养 Water retention	3.24	1.92	0.55	22.40	21.33	0.17
土壤形成与保护 soil formation and conversation	2.84	2.21	1.06	3.32	0.47	0.83
废物处理 Waste disposal	1.67	1.00	0.52	24.00	16.88	1.33
生物多样性保护 Biodiversity conservation	3.36	2.37	0.73	6.15	3.90	1.67
娱乐文化 Recreation	1.10	0.63	0.12	7.82	5.05	0.40
碳资产价值 Carbon assets	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

生态资产总价值(EW)为直接价值与间接价值之和。

$$EW = EWI + EWD \quad (3)$$

1.3 模型介绍

生态系统过程模型能够动态评估生态系统变化, 结合生态价值评估模型能够为决策和管理人员提供数据化信息, 满足不断增长的生态价值评估服务需求。本研究中土壤有机碳(SC)和植被碳(VC)来源于生态系统过程模型——CEVSA2 模型的输出。应用生态系统过程模型(CEVSA)模型建立于 1998 年, 是一个基于生理生态过程模拟植物-土壤-大气系统能量、水、碳交换的生物地球化学循环模型^[29-31]。CEVSA2 模型是在 CEVSA 模型的基础上构建的新一代碳氮水耦合模型^[32]。CEVSA2 模型包括与植被类型相关的光合生理、分配、凋落、周转的参数以及与土壤质地类型相关的土壤水分参数等, 参数的取值来源于大量实验室和野外试验观测, 同时应用中国区域大量的地面观测数据进行了校准。CEVSA2 模型的模拟结果已经应用大量的多尺度的观测数据进行了验证和校准, 在全球和区域水平上应用于研究陆地生态系统碳循环对气候年际变化的响应^[32-39]。

1.4 量化气候变化和土地利用变化相对贡献的方法

设 t_1 和 t_2 分别为生态资产计算时段的起始和终止时刻, t_1 和 t_2 时刻格点 i 的面积为 A_{1i}, A_{2i} , 格点 i 单位面积平均生态资产分别为 EW_{1i}, EW_{2i} , 则 t_1 到 t_2 时刻土地利用类型 i 的生态资产的变化量 ΔP_i 为:

$$\Delta P_i = A_{2i} EW_{2i} - A_{1i} EW_{1i} \quad (4)$$

对公式(4)进行转换, 设土地利用变化面积 $\Delta A_i = A_{2i} - A_{1i}$, $\Delta EW_i = EW_{2i} - EW_{1i}$, 可将公式(4)进行展开得到:

$$\Delta P_i = A_{1i} \Delta EW_i + \Delta A_i EW_{2i} \quad (5)$$

通过公式转换将气候变化和土地利用变化分别导致的生态资产变化进行了区分, 在土地利用类型不发生转换的情况下, 区域上由气候变化导致的生态资产的变化量 ΔE_c 为:

$$\Delta E_C = \sum_{i=1}^n A_{li} \Delta E W_i \quad (6)$$

式中, n 为区域上的格点数, 而区域上由土地利用变化所导致的生态资产的变化量 ΔE_L 为:

$$\Delta E_L = \sum_{i=1}^n \Delta A_i E W_{2i} \quad (7)$$

基于以上计算的 ΔE_L 和 ΔE_C , 气候和土地利用变化对区域陆地生态资产的贡献率 R_C 和 R_L 分别为:

$$R_C = \frac{\Delta E_C}{\Delta E_C + \Delta E_L} \times 100\% \quad (8)$$

$$R_L = \frac{\Delta E_L}{\Delta E_C + \Delta E_L} \times 100\% \quad (9)$$

1.5 数据来源和处理

驱动 CEVSA2 模型的气象数据来源于气象台站的观测数据, 应用 ANUSPLIN 软件^[40] 进行内插, 获得分辨率 30m 的栅格数据。大气 CO_2 浓度资料来自于美国夏威夷 Mauna Loa 观测所 (<https://www.co2.earth/>)。土壤类型和质地资料取自 1:1400 万土壤类型图和第二次土壤普查数据, 结合联合国粮食及农业组织 (FAO) 的土壤数据库 (HWSD v 1.2), <https://previous.iiasa.ac.at/>, 重采样到 30m 空间分辨率。基于 2000 年和 2015 年遥感影像解译了 30m 空间分辨率的土地利用数据。

2 结果与分析

2.1 2000—2019 年房山区生态资产及其变化

2.1.1 房山区生态资产总量及其空间分布

2019 年房山生态资产总价值为 177.14 亿元, 生态资产总价值占国内生产总值 (GDP) 的 23.3%。森林、草地、农田和湿地的生态资产分别占生态资产总价值的 82.33%、11.76%、5.25% 和 0.095%, 而直接价值分别占总量的 84.51%、6.90%、8.01% 和 0.009%。房山西部山地和丘陵区以森林为主, 生态资产较高, 总价值大部分区域在 11 万元/ hm^2 以上, 直接价值大部分区域在 1.2 万元/ hm^2 以上。东部以农田和建设用地为主, 生态资产相对较低, 总价值在 6 万元/ hm^2 以下, 直接价值大部分区域在 0.5 万元/ hm^2 以下 (图 2)。

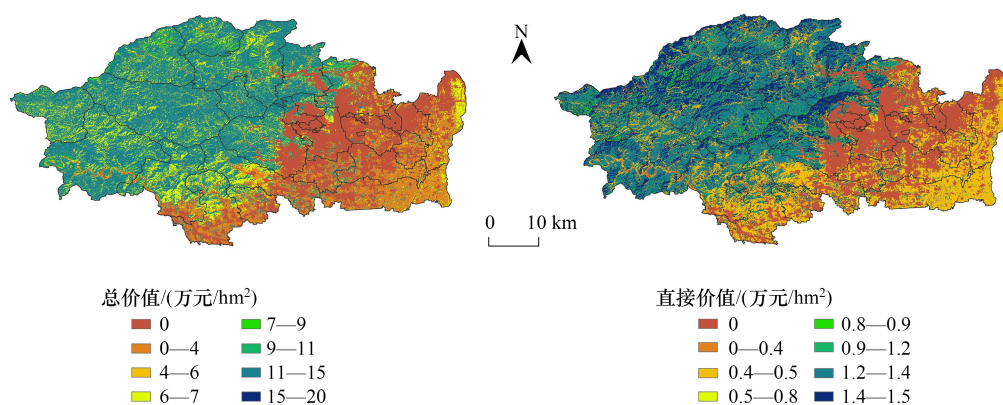


图 2 房山生态资产总价值和直接价值的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of total value and direct value of ecological assets in Fangshan District

由于不同生态系统类型的生态系统服务功能和面积的差异, 使得其在房山区生态资产间接价值中占比差异较大, 气体调节、气候调节、水源涵养、生物多样性维持和娱乐文化服务价值, 森林均占比超过 80%, 草地的占比约在 10% 左右, 而湿地的占比最小, 仅不到 1%。土壤形成与保护服务价值总量中森林、草地、农田和湿地分别占比 78.08%、14.89%、6.47% 和 0.02%。废物处理服务价值总量中森林、草地、农田和湿地分别占比

68.74%、17.96%、12.49%和 0.34%。在空间上,各项生态系统服务价值均是西部山地和丘陵区较高,而东部较低,除废物处理和娱乐文化服务价值外,其他生态系统服务价值均在在 1.4 万元/hm² 以上(图 3)。

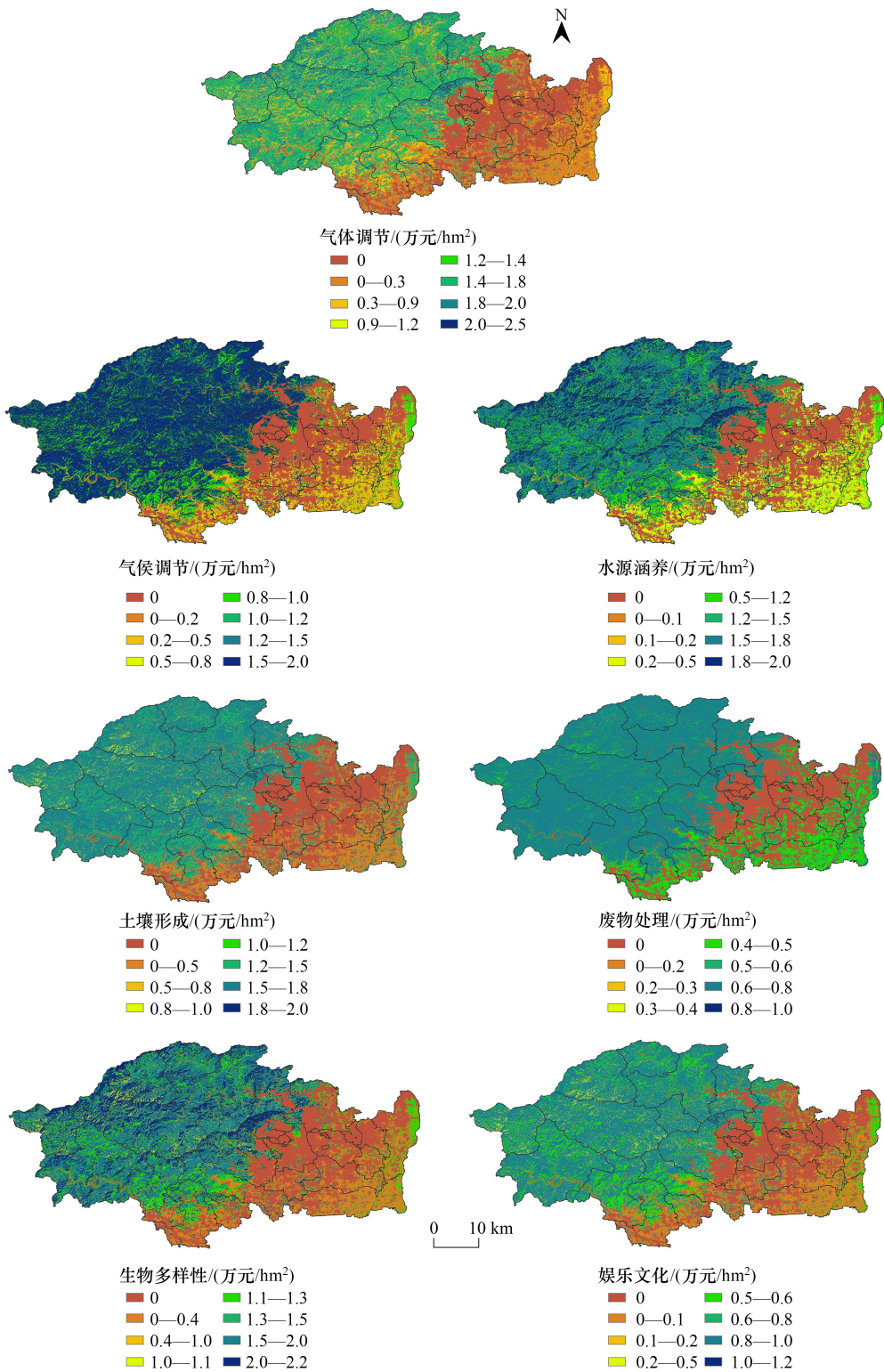


图 3 房山区生态系统气体调节服务、气候调节服务、水源涵养服务、土壤形成与保护服务、废物处理服务、生物多样性维持服务价值和娱乐文化的空间分布

Fig.3 The spatial pattern of gas regulation services, Climate regulation service, Water conservation services, For services to soil Formation and conservation, Waste treatment service, Biodiversity maintenance services and recreation and culture service values

2.1.2 2000—2019 年房山区生态资产的变化

2000 年至 2019 年是房山经济社会快速发展的时期,GDP 在 20 年间增长了 6.73 倍,GDP 年均增长 35.42%。同期,生态资产增加了 2.275 亿元,占 2000 年生态资产的 1.30%。其中森林、草地和湿地生态资产增加了 1.955 亿元、0.478 亿元和 0.475 亿元;农田和水域的生态资产则分别减少了 0.63 亿元和 0.003 亿元(表 2)。

表 2 房山生态资产总价值及其变化情况

Table 2 Changes in the total ecological assets of Fangshan District

土地利用类型 Land-use types	2000 年/亿元 2000/billion yuan	2019 年/亿元 2019/billion yuan	变化量/亿元 Change in values/ billion yuan
森林 Forest	128.095	130.050	1.955
草地 Grassland	20.912	21.390	0.478
农田 Cropland	20.564	19.934	-0.630
湿地 Wetland	5.051	5.526	0.475
水域 Water bodies	0.243	0.240	-0.003
建设用地 Artificial surfaces	0	0	0
合计 Total	174.865	177.140	2.275

2.2 气候变化和土地利用变化对房山区生态资产变化的相对贡献

过去 20 年,房山区的气温和降水均表现为增加趋势,气候倾向率分别为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $53.40\text{mm}/10\text{a}$,升温伴随着降水增加有利于植被的生长和恢复,促进了生态系统有机碳的累积。因此,气候变化使得各类型生态资产均增加,增加值达到 2.689 亿元。气候变化对森林和草地的生态资产变化贡献最大,分别达到 95.78% 和 92.10%。土地利用变化则是农田、湿地和水域生态系统生态资产变化的主要原因,分别贡献了 75.78%、97.90% 和 66.67%,土地利用变化使得房山区总的生态资产共减少了 0.414 亿元(表 3)。

表 3 气候变化和土地利用变化对生态资产变化的相对贡献

Table 3 Relative contributions of climate change and land use change to changes in ecological asset values

土地利用类型 Land-use types	ΔE_C /亿元 ΔE_C	$\Delta A/\text{km}^2$	ΔE_L /亿元 ΔE_L	$R_C/\%$	$R_L/\%$
森林 Forest	1.87	1.378	0.085	95.78	4.221
草地 Grassland	0.523	-0.787	-0.045	92.10	7.90
农田 Cropland	0.283	-36.256	-0.913	24.22	75.78
湿地 Wetland	0.01	0.741	0.465	2.10	97.90
水域 Water bodies	0.003	-2.518	-0.006	33.33	66.67
建设用地 Artificial surfaces	0	37.411	0		
合计 Total	2.689	-0.031	-0.414		

(1) ΔE_C : 由气候变化导致的生态资产的变化量 The amount of change in ecological assets due to climate change; (2) ΔA : 土地利用变化面积 Area of land-use change; (3) R_C : 气候变化对区域陆地生态资产的贡献率 The Contribution rate of climate change to regional terrestrial ecological assets; (4) R_L : 土地利用对区域陆地生态资产的贡献率 The Contribution rate of land-use to regional terrestrial ecological assets

2.3 2000—2019 年房山区各乡镇生态资产变化的比较

受各乡镇土地利用类型和总面积的影响,房山区共 28 个乡镇中,生态资产排名最高的为霞云岭乡,2019 年生态资产总价值达到 12.142 亿元,其后依次为十渡镇、佛子庄乡、蒲洼乡、张坊镇、史家营乡,这些乡镇的生态资产均超过 5 亿元。生态资产超过 1 亿元的乡镇共有 15 个,超过 1 千万元的乡镇共有 25 个。迎风街道、新镇街道、星城街道均不足 1 千万元,其中星城街道最低,仅为 3 万元,这些街道主要分布在东部平原城区,以建设用地为主(图 4)。

从 2000 年至 2019 年各乡镇生态资产变化的绝对量来看,受气候变化和生态保护与修复的影响,21 个乡

镇的生态资产均增加,主要分布在西部山地、丘陵区。琉璃河镇湿地保护与修复成效显著,生态资产增加最为显著,其后依次为霞云岭乡、佛子庄乡、大安山乡等。房山区另有 8 个乡镇在研究时段内生态资产下降,主要分布在东部建设用地快速扩张的乡镇,其中拱辰街道下降最为显著,共下降了 0.125 亿元(图 4)。

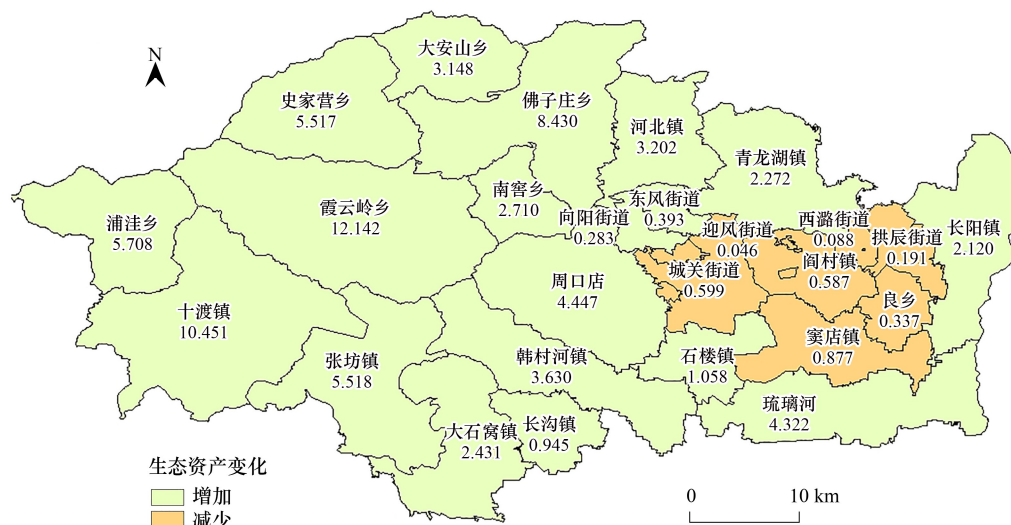


图 4 2019 年房山区各乡镇生态资产(亿元)和乡镇生态资产变化情况

Fig.4 All villages ecological assets (billion yuan) and their change in Fangshan District

由气候变化引起的房山区各乡镇生态资产的变化均表现为增加,有 17 个乡镇的生态资产变化由气候变化所主导,其中霞云岭乡由于气候变化导致的生态资产增加最高,其相对贡献高达 99.66%。有 11 个乡镇的生态资产变化由土地利用变化所主导。植树造林和生态保护与修复会促进生态资产的增长,在琉璃河、大安山乡、石楼镇等 7 个乡镇土地利用变化使得生态资产增加。毁林开荒等破坏生态环境的行为会造成生态资产的减少甚至丧失,土地利用变化在 20 个乡镇均使得生态资产下降,其中城关街道、拱辰街道和窦店镇由于建设用地的扩张,下降最为显著。

3 讨论

本研究计算的房山区 2019 年生态资产总价值为 177.14 亿元,约占同期 GDP 的 23.3%。马国霞等^[8]核算的我国 2015 年 GEP 约是同期 GDP 的 1.01 倍。谢高地等^[18]基于当量因子法计算的 2010 年中国生态系统服务价值为 38.10 万亿元,约为同期 GDP 的 94.97%。牟雪洁等^[9]计算的 2016 年北京市延庆区 GEP 为 335.63 亿元。本研究中生态资产对自愿减排市场的碳交易价格较为敏感,在本研究中年平均的碳交易价格取值为 13.6 元/t CO₂,近年来,碳抵消的价格在逐步上涨,2022 年初已经上涨至 14.4 美元,预计到 2030 年碳价可能高达 50 美元/t CO₂。由此可见,本研究采用的碳交易价格相对偏低,使得核算的生态资产总价值也相对偏低。另外,本研究采用了平均的碳交易价格,忽略了研究时段内碳交易市场价格的波动,以提高不同区域生态资产核算结果的可比性,同时忽略了由于碳价变化对生态资产变化的影响,以更好地分析气候变化和土地利用变化的相对贡献。

GEP 的核算方法体系是目前国内应用最为广泛的生态产品价值核算方法,但在进行区域核算过程中,需要采集的行业数据庞杂,数据采集、处理、参数选择和计算的工作量较大,耗时长、成本高^[41],较难实现快速的、动态的价值评估。而且不同研究者在进行区域核算时,对于核算指标及其计算方法的选择、参数的确定、定价方法等的不同,使得不同区域核算结果的可比性相对较差。基于单位面积价值当量因子的方法采用标准生态服务价值当量因子和基础当量表,能够快速完成区域核算,且不同区域之间可比性较强。但是,当量因子

反应的是各类生态系统服务价值相对于碳资产价值的重要性,取值来源于专家知识^[14-15],缺乏机理解释,不能准确反映不同类型生态系统和不同类型生态系统服务的价值、动态及其主导影响因素的差异,同时对标准生态服务价值当量因子的定价较为敏感,对核算的生态资产总价值影响较大,其结果也缺乏充分的验证。未来随着生态基础观测数据和 GEP 功能量核算成果的累积,逐步建立不同区域、不同类型生态系统中生态系统调节服务、支持服务和文化服务与碳储量之间的定量关系,从而获得更为准确、详细和动态的当量因子表,进一步提升核算结果的科学性、易操作性和可比性。

生态资产核算的目的在于应用,在进行地区生态文明建设成效评估、干部离任生态环境审计、生态补偿机制建立过程中,如何定量区分人类活动的相对贡献具有重要意义。目前无论是 GEP 的核算方法体系还是单位面积价值当量因子法都无法将人类活动的影响进行定量区分。本研究将生态系统的碳资产价值作为标准生态服务价值当量因子,并构建了一个能够定量区分气候变化和土地利用变化对生态资产变化相对贡献的方法,从而能够将生态产品价值评估的结果与政策决策与管理很好地整合,提升了生态产品价值评估的有效性、必要性和应用价值,为区域生态文明建设的一系列决策提供了技术支持。房山在 2000—2019 年期间,由于经济社会快速发展,城镇化建设的需求,各类建筑用地需求增加,过去 20 年,建设用地增加了 37.411 km²,占 2015 年房山区城乡建设用地的 12.27%,建设用地的增加主要来源于农田面积的减少,过去 20 年房山区农田面积减少了 36.256 km²,其次是水域面积减少了 2.518 km²,草地的面积也有所减少,但同时期也是房山区开展生态文明建设,加强生态系统保护与修复的重要时期。得益于房山区生态文明建设的成效,森林和湿地面积均有所增加,通过新增造林森林面积增加了 1.38 km²,湿地面积也增加了 0.74 km²。建设用地的扩张使得房山区生态资产总价值减少了 0.967 亿元,森林和湿地面积的增加使得生态资产共增加了 0.55 亿元,气候变化则使得生态资产增加了 2.689 亿元,因此过去 20 年房山区生态资产净增加了 2.275 亿元,由此可以看出,气候变化和生态保护与修复抵消了城市扩张所造成的生态资产损失。另外,本研究构建的算法是定量区分气候变化和土地利用变化对生态资产变化的相对贡献,但人类活动的影响除土地利用变化外,还包括生态修复与保护、森林经营管理、草场可持续经营、农田管理等,需要进一步改进算法,从而能够定量区分各种人类活动对生态系统及其资产变化的相对贡献。

4 结论

基于本研究构建的快速、动态的生态资产变化评估方法,2019 年房山陆地生态系统生态资产总价值的评估结果为 177.14 亿元。森林、草地、农田和湿地的生态资产分别占生态资产总价值的 82.33%、11.76%、5.25% 和 0.095%。房山在 2000—2019 年期间,生态资产总价值增加了 2.275 亿元,占 2000 年生态资产总价值的 1.30%。

房山在 2000—2019 年期间,由于经济社会快速发展,城镇化建设的需求,建设用地增加了 37.411 km²,农田、水域、草地面积的减少,使得房山总生态资产减少了 0.967 亿元。但得益于房山区生态文明建设的成效,森林和湿地面积均有所增加,森林和湿地生态资产共增加了 0.55 亿元。过去 20 年气候变化有利于房山区生态资产的提升,使得生态资产增加了 2.689 亿元,因此在过去 20 年房山区的生态资产总体表现为增加,气候变化和生态保护与修复抵消了城市扩张所造成的生态资产损失。

房山区生态资产西高东低,森林主要分布在西部山区,其中霞云岭乡生态资产最高,东部平原区以建设用地、农田为主,生态资产相对较低。过去 20 年房山区生态资产增长最为显著的是琉璃河街道,由于建设用地扩张也主要发生在东部地区,拱辰街道的生态资产下降最为显著。

参考文献(References):

- [1] 白杨,李晖,王晓媛, Juha M. Alatalo, 江波,王敏,刘文俊. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1100-1112.
- [2] 谢高地. 生态资产评价: 存量、质量与价值. 环境保护, 2017, 45(11): 18-22.

- [3] 戴君虎, 王焕炯, 王红丽, 陈春阳. 生态系统服务价值评估理论框架与生态补偿实践. 地理科学进展, 2012, 31(7): 963-969.
- [4] 刘尧, 张玉钧, 贾倩. 生态系统服务价值评估方法研究. 环境保护, 2017, 45(6): 64-68.
- [5] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖懿. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [6] 徐婷, 徐跃, 江波, 张玲, 宋文彬, 周德民. 贵州草海湿地生态系统服务价值评估. 生态学报, 2015, 35(13): 4295-4303.
- [7] 张翼然, 周德民, 刘苗. 中国内陆湿地生态系统服务价值评估——以 71 个湿地案例点为数据源. 生态学报, 2015, 35(13): 4279-4286.
- [8] 马国霞, 於方, 王金南, 周夏飞, 袁婧, 牟雪洁, 周颖, 杨威杉, 彭菲. 中国 2015 年陆地生态系统生产总值核算研究. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1474-1482.
- [9] 牟雪洁, 王夏晖, 张箫, 饶胜, 朱振肖. 北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化. 水土保持研究, 2020, 27(1): 265-274, 282.
- [10] 欧阳志云, 林亦晴, 宋昌素. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例. 环境与可持续发展, 2020, 45(6): 80-85.
- [11] 钱大文, 曹广民, 杜岩功, 李茜, 郭小伟. 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(4): 1392-1404.
- [12] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3207-3217.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [14] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [15] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积机制当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [16] 谢高地, 张钊铨, 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.
- [17] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [18] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [19] 张明军, 范建峰, 虎陈霞, 张勃. 兰州市改善大气环境质量的总经济价值评估. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 28-32.
- [20] 徐雨晴, 周波涛, 於玲, 石英, 徐影. 气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征. 生态学报, 2018, 38(6): 1952-1963.
- [21] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [22] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. 地理研究, 2015, 34(4): 691-700.
- [23] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. 生态学报, 2017, 37(2): 566-575.
- [24] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [25] Polasky S. *Natural Capital and Human Well-Being*, American Association for the Advancement of Science, 2011.
- [26] Estoque R C, Murayama Y. Landscape pattern and ecosystem service value changes: implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 116: 60-72.
- [27] Sannigrahi S, Pilla F, Basu B, Basu A S, Sarkar K, Chakraborti S, Joshi P K, Zhang Q, Wang Y, Bhatt S, Bhatt A, Jha S, Keesstra S, Roy P S. Examining the effects of forest fire on terrestrial carbon emission and ecosystem production in India using remote sensing approaches. *Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138331.
- [28] 鲍文楷, 谢苗苗. 城市土地利用的生态状况时空变化分析——以北京市房山区为例. 绿色科技, 2018(4): 196-200.
- [29] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [30] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185-198.
- [31] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Yan H M, Guo R, Li J. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981-2010. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 171-179.
- [32] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 刘世荣. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 2016, 36(6): 1515-1525.
- [33] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Liu Z J, Hao M, Guo R. Climate-driven uncertainties in modeling terrestrial ecosystem net primary productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 123-132.
- [34] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Guo R, Yan C R. Effects of climate warming on net primary productivity in China during 1961—2010. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(17): 6736-6746.
- [35] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [36] Zhang L, Ren X L, Wang J B, He H L, Wang S Q, Wang M M, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Zhou L, Niu Z E, Ge R, Li Y Y, Lv Y, Yan H M, Huang M, Yu G R. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003.
- [37] Yu L, Gu F X, Huang M, Tao B, Hao M, Wang Z S. Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on net primary productivity and carbon balance in China's terrestrial ecosystems. *Sustainability*, 2020, 12: 2849.
- [38] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Yu L, Yan H M, Guo R, Zhang L, Zhong X L, Yan C R. Climate-induced increase in terrestrial carbon storage in the Yangtze River Economic Belt. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(12): 7211-7225.
- [39] Yu L, Zhou B T, Xu Y Q, Zhang Y X, Gu F X. Projections of the net primary production of terrestrial ecosystem and spatiotemporal responses to climate change in the Yangtze River economic belt. *Diversity*, 2022, 14(5): 327.
- [40] Hutchinson M F. A new objective method for spatial interpolation of meteorological variables from irregular networks applied to the estimation of monthly mean solar radiation, temperature, precipitation and windrun. In E. A. Fitzpatrick & J. D. Kalma (Eds.), *Need for climatic and hydrological data in agriculture in south-east Asia. Proceedings of the United Nations University Workshop*, December 1983. Division of Water Resources Technical Memorandum 89/5 (pp. 95-104). Canberra: CSIRO, 1989.
- [41] Zhou P, Zhang H J, Huang B, Ji Y L, Peng S L, Zhou T. Are productivity and biodiversity adequate predictors for rapid assessment of forest ecosystem services values? *Ecosystem Services*, 2022, 57: 101466.