

doi: 10.6046/zrzyyg.2022224

引用格式: 胡晨霞, 邹滨, 梁玉, 等. 高空间分辨率生态系统生产总值时空演化分析——以 2000—2020 年湖南省为例[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 179–189. (Hu C X, Zou B, Liang Y, et al. Spatio-temporal evolution of gross ecosystem product with high spatial resolution: A case study of Hunan Province during 2000—2020[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 179–189.)

高空间分辨率生态系统生产总值时空演化分析 ——以 2000—2020 年湖南省为例

胡晨霞^{1,2}, 邹滨^{1,2}, 梁玉¹, 贺晨骋³, 林治家³

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 自然资源部时空信息与智能服务重点实验室, 长沙 410083; 3. 湖南省地质调查院, 长沙 410116)

摘要: 基于现有生态系统服务理论与方法, 通过引入文教科研指标、优化气体调节指标, 提出了湖南省本土自然资源生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP)核算指标体系, 集成构建了 GEP 格网化评估模型, 在 30 m × 30 m 格网尺度评估分析了全省 2000 年、2010 年和 2020 年 GEP 时空演化特征。研究结果表明: ①时间维度, 近 20 a 间湖南省 GEP 上升 3.34 × 10⁵ 亿元, 增幅达 40.28%; 各生态系统类型对 GEP 贡献的排序为: 森林 > 农田 > 草地 > 湿地 > 城市。②空间维度, 湖南省 GEP 总体呈现出西部和东南部高、中部和北部低的空间分布格局; 西部武陵山片区增长率高, 北部洞庭湖区增长率低。③与已有 10 km × 10 km 研究结果相比, 本研究高空间分辨率 GEP 结果在水域及城市生态系统呈现的空间分布细节信息更多。④各单项生态系统功能价值量对湖南省 GEP 的贡献度排序随时间呈现规律性变化, 土壤保持功能价值量的贡献对武陵山片区和洞庭湖区 GEP 变化占据主导作用。研究结果可为湖南省自然资源监管及生态环境保护提供科学决策依据。

关键词: 自然资源; 生态系统生产总值; 高空间分辨率; 时空演化; 湖南省

中图法分类号: TP 79; F 301.24; P 951 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0179-11

0 引言

自然资源为人类提供了有形的物质产品与无形的生态服务, 是人类赖以生存和可持续发展的基础。然而, 因经济高速发展以及人们对自然资源合理利用和生态环境有效保护的认知不足, 自然资源被过度开发、占有、索取, 导致生态系统被破坏、生态环境不断恶化的现象时有发生^[1]。为掌握自然资源开发利用状况、评估生态环境影响, 国内外学者对生态系统服务价值展开了系列研究并取得了丰硕成果^[2-4]。但在双碳目标国家重大战略背景下, 如何将生态效益与经济发展评价体系结合, 形成生态文明建设成果核算指标体系, 是保障可持续发展和生态文明建设目标实现亟待解决的关键问题。

借鉴国内生产总值(gross domestic product, GDP)概念, 欧阳志云等^[5]提出了可评价与分析生态

系统对人类经济社会发展支撑作用, 以及对人类福祉贡献的评估核算指标——生态系统生产总值(gross ecosystem product, GEP), 即生态系统为人类提供的产品与服务价值的总和。自此, 我国学者从全国^[6]、省域^[7]、市域^[8]、县域^[9]等不同尺度围绕 GEP 核算开展了系列研究。伴随着 3S 技术的发展, 近年来基于行政区划面板数据的地级市间^[10]、区县间^[11]、乡镇甚至行政村间^[9] GEP 差异分析已成为常态, 但此类研究仍存在难以揭示面板单元内部 GEP 空间差异的缺陷。对此, 有学者通过单位面积价值空间化方法探讨分析了 GEP 空间变化特征^[12-13], 亦有少数学者尝试以参与计算的栅格数据分辨率为基准, 在 500 m × 500 m 格网尺度评估了青海省域长时序单一调节服务价值量的空间分布^[14]、在 90 m × 90 m 格网尺度评估了 2017 年与 2020 年长三角地区 GEP 及各单项生态系统功能价值量的空间分布^[15]、在 30 m × 30 m 格网尺度分别评估了

收稿日期: 2022-06-01; 修订日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目“面向城市微环境场景的 PM_{2.5} 浓度空间分布精细模拟”(编号: 41871317)和湖南省自然资源科研项目“矿产资源价值评估模型研究”(编号: 2020-11)共同资助。

第一作者: 胡晨霞(1994-), 女, 博士研究生, 研究方向为自然资源与可持续发展。Email: huchenxia0116@126.com。

通信作者: 邹滨(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为大气/土壤遥感监测、自然资源监测与分析。Email: 210010@csu.edu.cn。

单一年份浙江省域^[16]和长株潭城市群^[17]的调节服务及各单项生态系统功能价值量的空间分布、在 2 m × 2 m 格网尺度评估了单一年份北京市延庆区 GEP、物质产品、调节服务与文化服务功能价值量的空间分布^[18],初步揭示了 GEP 的空间异质性。然而,受限于数据可获取性等原因,对于同时进行省域、长时序、高空间分辨率 GEP 及各单项生态系统功能价值量时空演化特征的综合研究鲜见报道。

针对上述问题,本研究以湖南省为例,在综合考虑湖南省生态环境特点及先验研究基础上,优化提出了一套湖南省本土化 GEP 核算指标体系,集成构建了顾及数据可获取性的高空间分辨率 GEP 格网化评估模型,在 30 m × 30 m 格网尺度分析了湖南省 2000—2020 年 GEP 长时序空间变化规律及单项生态系统功能价值量贡献,以期为湖南省生态环境保护提供科学决策依据。

1 研究区概况

湖南省地理位置为: E108°47' ~ 114°13', N24°39' ~ 30°08', 位于我国中部、长江中下游南部(图 1),总面积约为 21.18 万 km²。全省东、西、南三面环山,总体地势西高东低、南高北低,呈向东偏北开口的不对称“马蹄”形。省内西部武陵山片区是全国区域发展与扶贫攻坚示范区,北部洞庭湖生态修复工程入围国家第三批山水林田湖草生态保护修复工程试点,二者形成长江流域重要生态安全保护屏障。伴随着新型城镇化建设中对自然资源的开发利用,湖南省土地利用格局发生显著变化^[19],引发了植被净初级生产量减少^[20]和生态系统服务供需空间分布不均衡^[21]等问题,严重制约了经济高质量发展。因此,开展湖南省自然资源 GEP 核算评

估与分析,对省内生态环境保护、可持续发展以及长江流域生态环境协调发展具有重大现实意义。

2 GEP 核算

2.1 GEP 核算指标选取

目前被广泛采用的 GEP 核算指标体系包括物质产品、调节服务和文化服务 3 个一级指标。物质产品包括食物及原材料生产和能源;调节服务包括气体调节、气候调节、水文调节和土壤保持;文化服务包括景观价值和文化价值^[5]。但也有学者在进行 GEP 核算时,根据研究区生态环境状况增加维持生物多样性及科学研究等指标^[6-7],对上述指标进行重构。

综合考虑现有生态系统服务价值^[2,4]及 GEP^[5]核算指标,参考生态环境部 2020 年发布的《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》框架^[22],本研究在湖南省 GEP 核算中,一方面沿用了食物及原材料生产、有机物质生产、水资源供给、土壤保持、维持生物多样性等大部分通用评估指标。另一方面,因生态系统文化服务功能源于生态系统组分和过程的文学艺术灵感、知识、教育和景观美学等^[5],而现有文化服务价值核算指标多以景观旅游价值为主、对知识教育价值核算较少,未完全体现生态系统文化服务价值量,且湖南省洞庭湖、湘西地区等生态环境问题近年来已再次引发学术界广泛关注,本研究对此在文化服务功能价值量核算中,在沿用原休闲旅游指标基础上引入了体现知识教育价值的文教科研指标。同时,考虑到湖南省 PM_{2.5} 污染不容忽视的历史实际^[23],且研究表明 PM_{2.5} 对人体健康和大气环境具有严重负面影响、甚至致人过早死亡^[24],而森林植被可以有效降低空气中的 PM_{2.5} 浓度^[25],因此本研究亦将“降低 PM_{2.5} 暴露水平”这一指标补充纳入了气体调节功能二级指标。

2.2 GEP 格网化评估建模

为反映 GEP 评估结果空间异质性,本研究以 30 m × 30 m 格网为基本单元构建了 GEP 格网化评估模型,即

$$GEP_n = \sum_{i=1}^{10} V_{ji} \quad , \quad (1)$$

式中: GEP_n 为格网单元 n 的 GEP,元; V_{ji} 为格网单元 n 所在的生态系统类型 j (农田、森林、草地、湿地和城市)的第 i 个二级指标核算的生态系统功能价值量,元。各指标具体计算方法如表 1 所示。

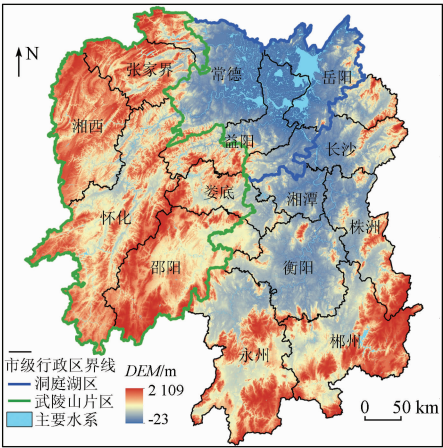


图 1 研究区概况
Fig.1 Location of study area

表 1 湖南省自然资源资产 GEP 核算方法		
Tab.1 Accounting methods of the GEP of natural resource assets in Hunan Province		
生态产品与服务类型	二级指标	指标描述及计算方法
物质产品	食物及原材料生产	生产农副产品、提供工业原料,计算方法参考文献[5]
	有机物质生产	将无机物转化为有机物,计算方法参考文献[26]
	水资源供给	地表产流、土壤含水量、冠层截留量等,计算方法参考文献[27]
调节服务	气体调节	由固碳释氧价值 ^[5] 、净化空气价值 ^[28] 、森林生态系统降低 PM _{2.5} 暴露水平价值和温室气体排放的负效应价值 ^[29-30] 叠加获得,计算方法详见表后文说明
	气候调节	增加湿度、降低大气温度,计算方法参考文献[29,31]
	水文调节	涵养水源、调洪蓄水,计算方法参考文献[32]
	土壤保持	保持土壤肥力、减少土地废弃、减轻泥沙淤积,计算方法参考文献[5,33]
	维持生物多样性	提供栖息地,计算方法参考文献[4]
文化服务	休闲旅游	旅游消费支出、旅游时间成本,计算方法参考文献[34]
	文教科研	生态主题科研论文产出,计算方法参考文献[35]

注：各年份的 GEP 采用湖南省居民消费价格指数 (consumer price index, CPI) 修正到 2019 年可比价格^[36]。

气体调节价值的计算公式为：

$$V_{gas} = V_{co} + V_{pur} + V_{PM_{2.5}} + V_{ghg} \quad (2)$$

式中： V_{gas} 为气体调节价值,元； V_{co} 为固碳释氧价值,元； V_{pur} 为净化空气价值,元； $V_{PM_{2.5}}$ 为森林生态系统降低 PM_{2.5} 暴露水平的价值,元； V_{ghg} 为温室气体排放的负效应价值,元。其中,本研究新增的森林生态系统降低 PM_{2.5} 暴露水平价值采用支付意愿法计算。其计算公式为：

$$V_{PM_{2.5}} = AM \cdot VSL \quad (3)$$

式中： $V_{PM_{2.5}}$ 为格网单元上因降低 PM_{2.5} 暴露水平而避免过早死亡的价值,元； VSL 为个人最低工资标准,经 CPI 修正后为 7 310 065.86 元/人^[24]； AM 为格网单元上避免过早死亡人数,人。其计算公式为：

$$AM = [(M_{NF}/AREA_{NF}) AREA_F - M_F]/N_F \quad (4)$$

式中： M_{NF} 和 M_F 分别为非森林地区和集中连片森林地区因 PM_{2.5} 暴露而过早死亡人数,人； $AREA_{NF}$ 为非森林地区面积, hm²； $AREA_F$ 为面积大于 2 000 hm² 的集中连片森林地区面积, hm²； N_F 为集中连片森林区域的格网数。其中格网单元 n 上因 PM_{2.5} 暴露而过早死亡人数 M 计算公式为：

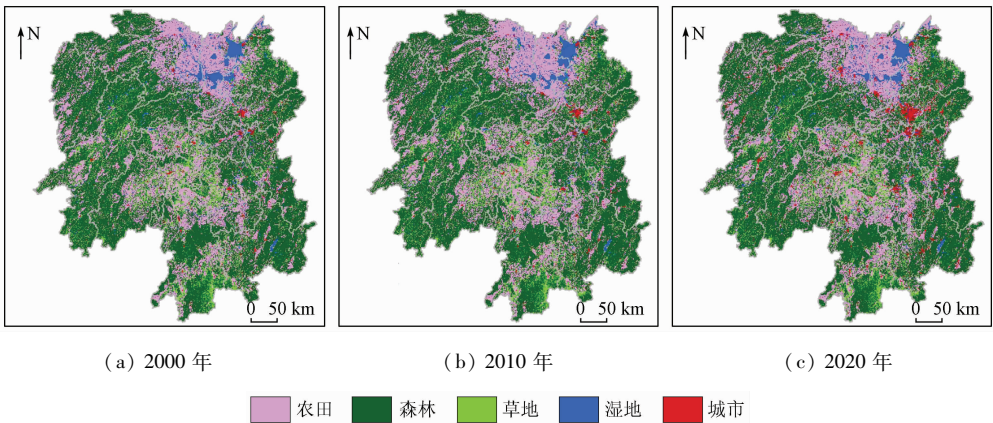
$$M = \frac{HR(C_n) - 1}{HR(C_n)} POP_n l \quad (5)$$
$$HR(C_n) = \exp\left[\frac{\theta \lg\left(\frac{z}{\alpha}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{z - \mu}{v}\right)}\right] \quad (6)$$
$$z = \max(0, C_n - 2.4) \quad (7)$$

式中： POP_n 为格网单元 n 的人口数量,人； l 为成年人基准死亡率,取各年份中国地区均值； $HR(C_n)$ 为相对风险指数； C_n 为格网单元 PM_{2.5} 浓度, μg/m³； θ , α , μ 和 v 均为模型中与年龄相关的参数,这里分别取值为 0.143,1.6,15.5 和 36.8^[37]。

2.3 GEP 评估数据收集与处理

2.3.1 土地利用数据

土地利用数据采用 2000 年、2010 年和 2020 年 GlobeLand30 全球土地覆被数据产品 (<http://www.globallandcover.com/>),空间分辨率为 30 m。本研究将土地利用数据重分类为农田、森林、草地、湿地和城市共 5 类生态系统类型^[5] (图 2)。



(a) 2000 年 (b) 2010 年 (c) 2020 年

农田 森林 草地 湿地 城市

图 2 2000—2020 年湖南省生态系统类型

Fig.2 Ecosystem types from 2000 to 2020 in Hunan Province

2.3.2 植被数据

植被数据包含归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 和蒸散发 (evapo-transpiration, ET) 数据。NDVI 数据来源于 NASA 提供的 Terra 卫星影像 MOD13A3 产品,空间分辨率为 1 km。2000 年和 2010 年 NPP 数据选自 MODIS/ MOD17A3 数据集,空间分辨率为 500 m,2020 年 NPP 数据选自 MODIS/ MOD17A2 数据集,时间分辨率为 8 d。2000 年和 2010 年 ET 数据选自 MODIS/ MOD16A3 数据集,空间分辨率为 1 km,2020 年 ET 数据选自 MODIS/ MOD16A2 数据集,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。

2.3.3 其他专题数据

其他专题数据主要包括研究区降水数据、地表 PM_{2.5}浓度数据、土壤数据、地形数据、人口数据和社会经济数据。降水数据下载自中国气象数据网 (http: //data. cma. cn/), 空间分辨率为 0. 5°。地表 PM_{2.5}浓度数据来源于 (http: //fizz. phys. dal. ca/ ~ atmos/ martin/), 空间分辨率为 1 km。土壤氮、磷、钾、有机质含量数据来源于中国土壤有机质数据集 (http: //poles. tpdc. ac. cn/zh - hans/), 空间分辨率为 1 km。土壤砂粒、黏粒、粉粒数据来源于世界土壤 (hanmonized world soil database, HWSD) 数据集,空间分辨率为 1 km。数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 来源于美国宇航局 (http: //srtm. csi. cgiar. org/srtmdata/) SRTM3 DEM 数据,空间分辨率为 90 m。人口数据来源于 WorldPop 官方网站 (https: //www. worldpop. org/), 空间分辨率为

1 km。农林牧渔产量及产值、旅游人数和旅游收入等数据来自《湖南省统计年鉴》; 大中小型水库蓄水量来自《湖南省水资源公报》。

本研究所有栅格数据均采用 Krasovsky_1940_ Albers 投影坐标系,地理坐标系为 GCSKrasovsky _ 1940_ Albers,基准面为 D_ Krasovsky_1940。鉴于土地利用数据为 GEP 核算的关键,因此本研究以土地利用数据的空间分辨率为准,其他栅格数据利用双线性插值法重采样至 30 m × 30 m 参与计算。

3 结果与分析

3.1 湖南省 GEP 时间维度分析

2000—2020 年湖南省 GEP 变化情况如表 2 所示,从表 2 中可以看出,湖南省 2000—2020 年 GEP 整体增长 3.34×10^5 亿元,增幅约 40.28% ,3 期 GEP 呈现先减后增的变化趋势。其中,2000—2010 年湖南省 GEP 减少 1.82×10^4 亿元,降幅约 2.20% ; 2010—2020 年湖南省 GEP 增长 3.52×10^5 亿元,增幅约 43.44% 。与湖南省已有 GEP 核算研究报道对比,本研究发现的 2000—2010 年湖南省 GEP 小幅下降的时间变化趋势与刘永强等^[38]、熊鹰等^[39] 的研究结果一致 (尚未有 2020 年湖南省 GEP 相关研究报道),与此同时,因对核算指标体系和计算方法的优化,本研究 2000 年和 2010 年核算的湖南省 GEP 结果分别为 8.28×10^5 亿元和 8.09×10^5 亿元,整体高于刘永强等^[38] 核算的 8.83×10^3 亿元和 8.77×10^3 亿元和熊鹰等^[39] 核算的 1.758×10^4 亿元和 1.755×10^4 亿元。

表 2 2000—2020 年湖南省 GEP 变化
Tab.2 Changes of GEP from 2000 to 2020 in Hunan Province

年份	指标	农田	森林	草地	湿地	城市	合计
2000 年	GEP/亿元	2.05×10^5	5.52×10^5	6.19×10^4	9.41×10^3	2.93	8.28×10^5
	贡献度/%	24.75	66.64	7.47	1.14	0.00	100.00
2010 年	GEP/亿元	2.09×10^5	5.34×10^5	5.78×10^4	8.61×10^3	23	8.09×10^5
	贡献度/%	25.82	65.97	7.14	1.06	0.00	100.00
2020 年	GEP/亿元	2.53×10^5	8.09×10^5	9.06×10^4	7.75×10^3	276	11.62×10^5
	贡献度/%	21.80	69.70	7.81	0.67	0.02	100.00
2000—2010 年	变化量/亿元	0.04×10^5	-0.18×10^5	-0.41×10^4	-800	20.07	-1.82×10^4
	变化率/%	1.95	-3.26	-6.62	-8.50	684.98	-2.20
2010—2020 年	变化量/亿元	0.44×10^5	2.75×10^5	3.28×10^4	-860	253	3.52×10^5
	变化率/%	21.05	51.50	56.75	-9.99	1 100	43.44
2000—2020 年	变化量/亿元	0.48×10^5	2.57×10^5	2.87×10^4	-1.66×10^3	273.07	3.34×10^5
	变化率/%	23.41	46.56	46.37	-17.64	9 319.80	40.28

分析各类型生态系统对湖南省 GEP 贡献可知, 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期皆是森林生态系统贡献最大,其余依次是农田、草地、湿地、城市生态系统,这与湖南省各生态系统类型面积占比排序一致,

可以看出各类型生态系统的面积对 GEP 的贡献度具有决定性影响。从各生态系统类型 GEP 的变化可以看出: 20 a 来湖南省城市生态系统 GEP 变化幅度最大,增幅达 9 319.80%,远高于其他生态系统

类型 GEP,与旅游业收入显著提升有关。

3.2 湖南省 GEP 空间维度分析

整体而言,湖南省 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期 GEP(图 3)均呈现出西高、中低的空间分布格局。森林生态系统因其植被覆盖率高,有利于提高土壤保持、气候调节等服务价值,同时高坡度地区人为活动较少、生态系统优越,因此,GEP 高值区域集中分布于湖南省西部及东南角,即森林生态系统与 DEM 高值分布区域;低值区主要分布在湖南省北部和中部,即农田、草地、湿地、城市生态系统所在区域。这一空间分布特征与熊鹰等^[39]基于 10 km×10 km 格网尺度的研究结果大体一致,但相比于后者,本研究

30 m×30 m 格网尺度的 GEP 结果可明显呈现更多空间分布细节信息,如图 3 所示区域 I(洞庭湖)湿地生态系统 GEP 均较低,而后者在该区域的生态系统服务价值相对较高^[39];区域 II(长株潭城市群)GEP 低值区与城市生态系统范围较为吻合,而这一结果在后者研究中没有呈现。此外,结合图 4 可以看出,湖南省有机物质生产、气体调节、气候调节、土壤保持和维持生物多样性功能价值量的空间分布格局与 GEP 较相似,皆呈现出“西部和东南部高”、“中部和北部低”的空间分布格局。说明森林生态系统对 GEP 及单项功能价值量的空间分布格局具有重要作用。

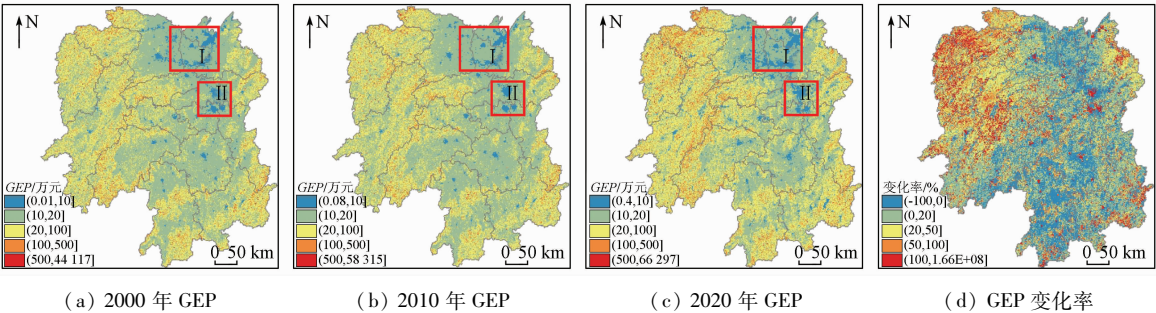


图 3 2000—2020 年湖南省 GEP 空间分布
Fig.3 Spatial distribution of GEP from 2000 to 2020 in Hunan Province

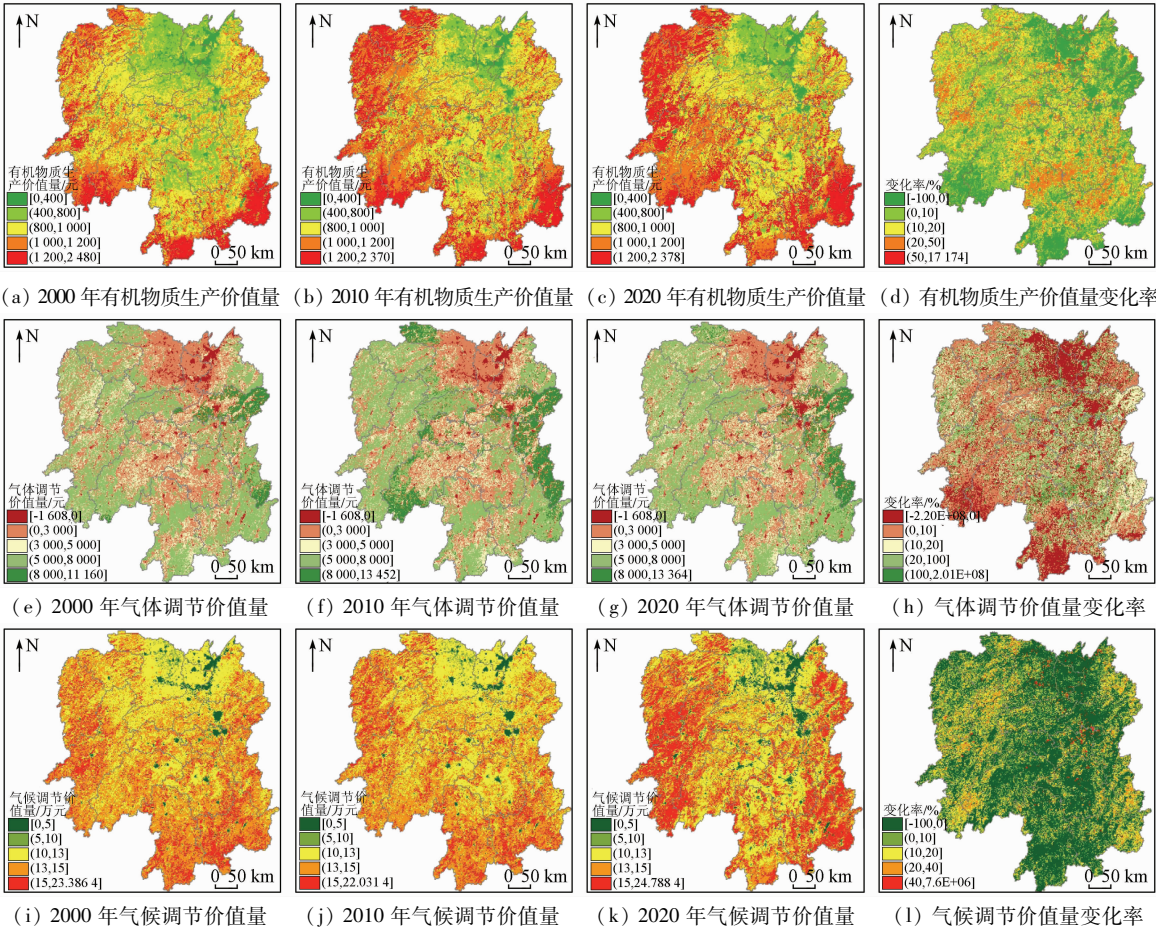


图 4-1 2000—2020 年湖南省各单项生态系统功能价值量空间分布
Fig.4-1 Spatial distribution of each ecosystem function value from 2000 to 2020 in Hunan Province

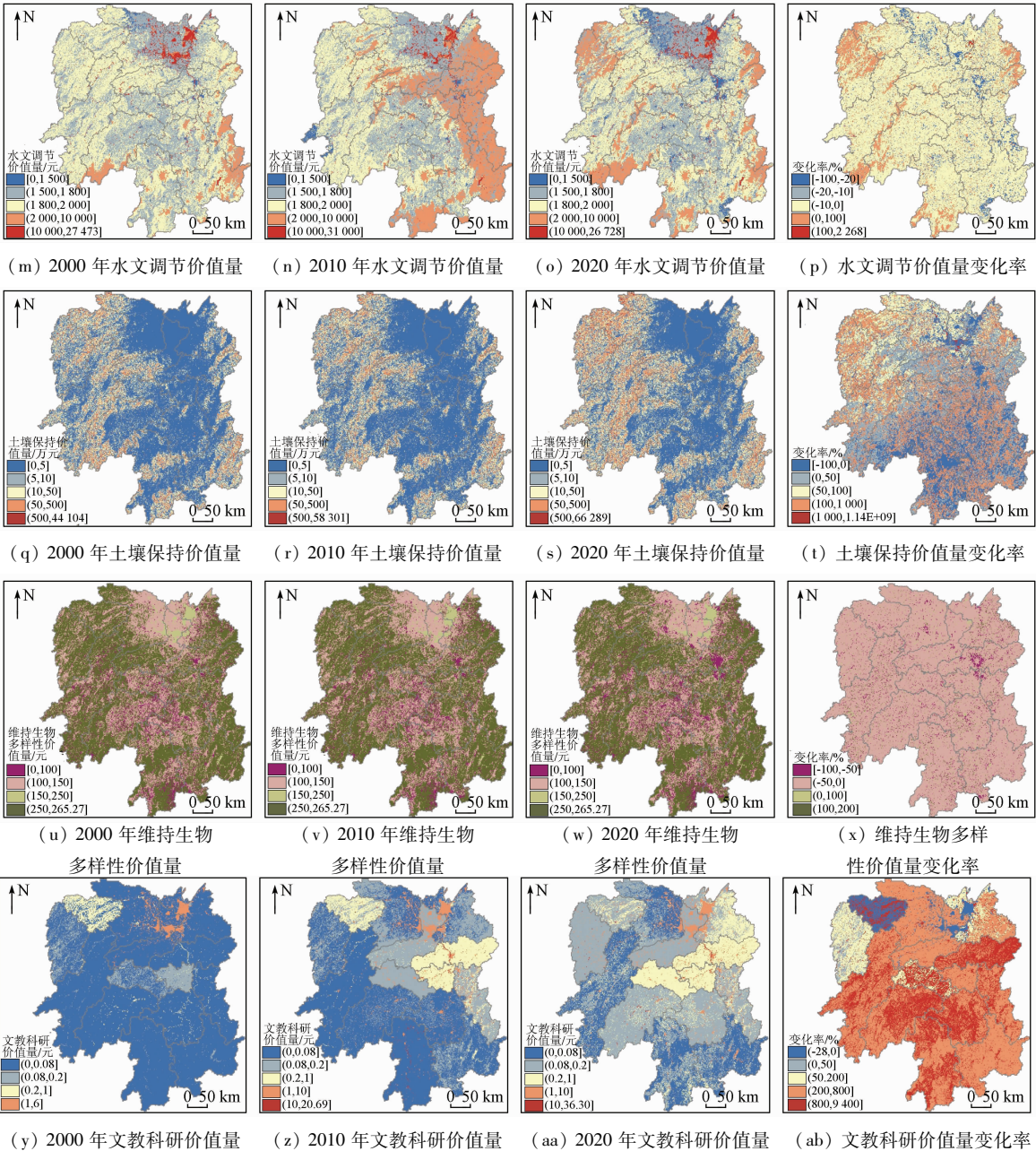


图 4-2 2000—2020 年湖南省各单项生态系统功能价值量空间分布

Fig. 4-2 Spatial distribution of each ecosystem function value from 2000 to 2020 in Hunan Province

分析湖南省 GEP 时空演化特征(图 3)可得, 2020 年湖南省西部武陵山片区 GEP 高值区范围明显扩大,且变化率显著较高。其中有机物质生产、气候调节、水文调节和水土保持功能价值量(图 4)的时空演化特征与 GEP 相似。其主要原因是,2000—2020 年间湖南省西部生态系统类型变化以草地向森林转移为主,森林生态系统面积的增加,导致该区域 GEP 增长,说明湖南省 2012 年出台的《中共湖南省委湖南省人民政府关于抓住西部大开发机遇加快湘西自治州发展的若干意见》中“加强生态建设和环境保护,构筑生态安全屏障”目标建设取得了重大成效,湘西武陵山片区生态环境得到了有效改善。此外,湖南省北部地区因水域面积增加、中部地区因

草地面积的增加导致 GEP 也略有提高,反映出湖南省退田还湖、退耕还林还草成效显著,整体生态环境有极大的改善。与此同时,湘西乃至湖南省全域生态环境问题愈发得到科研领域的重点关注。对比图 4 可以看出,2020 年文教科研功能价值量在湘西、张家界略有上升,同时在其他区域呈明显增长趋势。

与武陵山片区 GEP 逐年显著增高相反,洞庭湖区的 GEP 及各单项生态系统功能价值量均呈现低增长态势。主要原因是:前期洞庭湖区围垦规模较大造成水域面积下降,后期通过管控使得水域面积逐渐恢复、区域生态环境逐步得到改善^[38]。然而洞庭湖区生态环境问题仍须进一步加强改善,需要政府及相关部门持续重点关注。

3.3 单项生态系统功能价值量贡献分析

从时间上看,湖南省各单项生态系统功能价值量对GEP的贡献度(单项生态系统功能价值量与湖南省GEP之比)(表3)随时间呈现出规律性变化。森林生态系统在土壤保持、气候调节和气体调节等服务类型中发挥较大作用,且湖南省森林生态系统面积占比在50%以上,因此该3项功能价值量对湖南省GEP的贡献度在2000—2020年间一直位居前三。文教科研功能价值量贡献度则一直居于末位。水文调节、水资源供给、有机物质生产以及维持生物

多样性功能价值量的贡献度逐渐靠后。值得注意的是,随着人民物质生活水平的不断提高,休闲旅游人数剧增,湖南省因独特的张家界国家森林公园等自然景观、岳阳楼等文化遗产及声名大噪的茶饮、餐厅而成为最受欢迎的旅游胜地之一,因此休闲旅游功能价值量贡献度由2000年的倒数第二上升至2020年的第四位。同时,食物及原材料生产功能价值量的贡献度排序也逐渐靠前,这与近几年湖南省在不断深化农业结构性调整、优化种植结构与渔业养殖结构有关。

表3 2000—2020年湖南省各单项生态系统功能价值量分析
Tab.3 Analysis of each ecosystem function value from 2000 to 2020 in Hunan Province

生态系统功能	2000年			2010年			2020年		
	价值量/亿元	贡献度/%	排序	价值量/亿元	贡献度/%	排序	价值量/亿元	贡献度/%	排序
食物及原材料生产	1 301.27	0.16	7	2 908.66	0.36	6	4 077.17	0.35	6
有机物质生产	2 168.73	0.26	6	2 304.76	0.28	7	2 326.59	0.20	8
水资源供给	3 406.31	0.41	5	4 079.14	0.50	5	4 013.57	0.35	7
气体调节	9 659.66	1.17	3	10 948.36	1.35	3	10 494.53	0.90	3
气候调节	309 937.93	37.41	2	309 081.20	38.15	2	302 826.77	26.06	2
水文调节	6 082.96	0.73	4	6 239.15	0.77	4	6 120.74	0.53	5
土壤保持	495 191.72	59.77	1	472 297.52	58.29	1	821 967.65	70.72	1
维持生物多样性	489.52	0.06	8	488.87	0.06	9	481.50	0.04	9
休闲旅游	260.08	0.03	9	1 909.03	0.24	8	9 903.22	0.85	4
文教科研	0.39	0.00	10	0.72	0.00	10	0.89	0.00	10
总计	828 498.57	100.00	—	810 257.42	100.00	—	1 162 212.63	100.00	—

就地域而言,武陵山片区GEP(表4)总体上除2000—2010年呈负增长外,在2010—2020年和2000—2020年均为正增长,变化率分别为62.83%和61.81%。土壤保持功能价值量对片区GEP变化量的贡献度最高,分别达227.17%、97.25%和95.94%,而维持生物多样性功能价值量最低。2000—2020年,武陵山片区GEP整体增长273 530.91亿元,占全省同期增长总量的81.97%;其中,仅维持生物多样性

功能价值量为负增长,其余单项皆为正增长。分时间段来看,2000—2010年,武陵山片区GEP减少2 756.77亿元,占全省同期减少总量的15.11%;其中,仅土壤保持功能价值量呈现负增长,其余单项皆呈正增长趋势。2010—2020年,武陵山片区GEP整体增长276 287.68亿元,占全省同期增长总量的78.50%;其中,气体调节与维持生物多样性功能价值量呈负增长趋势,其余单项为正增长。

表4 2000—2020年武陵山片区各单项生态系统功能价值量分析
Tab.4 Analysis of each ecosystem function value from 2000 to 2020 in Wuling Mountain region

生态系统功能	2000年/亿元	2010年/亿元	2020年/亿元	2000—2010年		2010—2020年		2000—2000年	
				变化量/亿元	贡献度/%	变化量/亿元	贡献度/%	变化量/亿元	贡献度/%
食物及原材料生产	429.90	988.54	1 383.53	558.64	−20.26	394.99	0.14	953.63	0.35
有机物质生产	945.45	1 022.32	1 036.08	76.88	−2.79	13.76	0.00	90.64	0.03
水资源供给	1 251.65	1 394.24	1 661.71	142.59	−5.17	267.47	0.10	410.06	0.15
气体调节	4 228.93	4 772.56	4 613.73	543.63	−19.72	−158.83	−0.06	384.80	0.14
气候调节	129 111.18	129 932.62	130 481.39	821.44	−29.80	548.77	0.20	1 370.21	0.50
水文调节	2 006.45	2 037.57	2 112.59	31.12	−1.13	75.03	0.03	106.14	0.04
土壤保持	304 131.04	297 868.39	566 560.74	−6 262.65	227.17	268 692.35	97.25	262 429.70	95.94
维持生物多样性	205.81	205.84	204.73	0.03	0.00	−1.11	0.00	−1.09	0.00
休闲旅游	104.99	770.75	3 998.37	665.76	−24.15	3 227.62	1.17	3 893.38	1.42
文教科研	105.05	770.85	3 998.49	665.80	−24.15	3 227.64	1.17	3 893.44	1.42
总计	442 520.46	439 763.69	716 051.37	−2 756.77	100.00	276 287.68	100.00	273 530.91	100.00

与武陵山片区GEP增长率高相反,洞庭湖区的GEP变化率较低(表5),2000—2010年、2010—2020年和2000—2020年分别为2.58%、13.58%和16.50%。洞庭湖区GEP变化量贡献度最高与最低

单项均与武陵山片区相同。2000—2020 年,洞庭湖区 GEP 增长总量为 18 258.90 亿元,仅占全省同期增长总量的 5.47%;其中,气候调节、水文调节和维持生物多样性功能价值量为负增长,其余单项皆呈正增长趋势。分时间段来看,2000—2010 年洞庭湖区 GEP 增长量为 2 849.70 亿元,仅占全省同期减少

总量的 -15.62%;除水文调节和维持生物多样性功能价值量减少外,其余单项皆增加。2010—2020 年,洞庭湖区 GEP 增长量为 15 409.20 亿元,仅占全省同期增长总量的 4.38%;其中食物及原材料生产、土壤保持、休闲旅游和文教科研功能价值量呈正增长趋势,而其余单项均有不同程度的下降。

表 5 2000—2020 年洞庭湖区各单项生态系统功能价值量分析
Tab.5 Analysis of each ecosystem function value from 2000 to 2020 in Dongting Lake region

生态系统功能	2000 年/亿元	2010 年/亿元	2020 年/亿元	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2000 年	
				变化量/ 亿元	贡献 度/%	变化量/ 亿元	贡献 度/%	变化量/ 亿元	贡献 度/%
食物及原材料生产	493.84	1 072.18	1 496.74	578.34	20.29	424.56	2.76	1 002.90	5.49
有机物质生产	439.90	474.42	469.10	34.52	1.21	-5.32	-0.03	29.19	0.16
水资源供给	896.15	1 154.44	1 023.68	258.29	9.06	-130.77	-0.85	127.53	0.70
气体调节	1 713.09	1 996.10	1 864.92	283.01	9.93	-131.18	-0.85	151.83	0.83
气候调节	71 012.42	71 128.58	66 018.06	116.16	4.08	-5 110.52	-33.17	-4 994.35	-27.35
水文调节	2 352.26	2 320.66	2 233.64	-31.60	-1.11	-87.02	-0.56	-118.62	-0.65
土壤保持	33 507.33	34 283.73	50 688.85	776.40	27.24	16 405.12	106.46	17 181.52	94.10
维持生物多样性	114.76	114.42	111.59	-0.34	-0.01	-2.83	-0.02	-3.17	-0.02
休闲旅游	65.83	483.23	2 506.83	417.40	14.65	2 023.60	13.13	2 441.00	13.37
文教科研	66.12	483.62	2 507.19	417.50	14.65	2 023.56	13.13	2 441.06	13.37
总计	110 661.69	113 511.39	128 920.59	2 849.70	100.00	15 409.20	100.00	18 258.90	100.00

4 结论与讨论

本研究基于 GEP 领域已有研究成果并结合现阶段热点实际问题,对湖南省 GEP 核算评估指标体系进行了优化,并通过格网化评估模型的构建分析了湖南省 GEP 及各单项生态系统功能价值量的时空变化特征,为湖南省生态文明建设过程中的自然资源 GEP 核算评估与相关决策制定提供了参考。主要结论如下:

- 1)2000—2020 年湖南省 GEP 上升 3.34×10^5 亿元,增幅约 40.28%。各生态系统类型对 GEP 贡献的排序为:森林 > 农田 > 草地 > 湿地 > 城市生态系统。
- 2)湖南省 GEP 总体呈现出西部和东南部高、中部和北部低的空间分布格局,西部武陵山片区 GEP 增长率较高,北部洞庭湖区 GEP 及各单项生态系统功能价值量呈低增长态势,森林生态系统对 GEP 空间分布格局起决定性作用。基于 30 m × 30 m 格网尺度的高空间分辨率 GEP 结果在湿地及城市生态系统明显呈现更多的空间分布细节信息。
- 3)各单项生态系统功能价值量对湖南省 GEP 的贡献度排序随时间呈现出规律性变化:土壤保持、气候调节、气体调节功能价值量贡献度一直位居前三,文教科研功能价值量贡献度一直居于末位,水

文调节、水资源供给、有机物质生产以及维持生物多样性功能价值量贡献度排序逐渐靠后;休闲旅游、食物及原材料生产功能价值量的贡献度排序逐渐靠前。此外,土壤保持功能价值量的贡献对武陵山片区和洞庭湖区 GEP 变化占据主导作用。

本研究对湖南省 GEP 核算指标体系进行了优化,并获取了高空间分辨率的 GEP 及各单项生态系统服务功能价值量的空间分布结果,但仍需要从以下几个方面进行深入研究:一方面因生态系统蕴含的价值十分广泛,本研究采用的货币化评估结果仍难以全面反映 GEP,因此需要对指标体系进行进一步合理化调整,以增加研究结果的实用性。另一方面,本研究在进行 GEP 格网化评估时,采用与土地利用数据尺度相同的 30 m × 30 m 格网为基本单元,但受其他数据可获取性限制,只能通过重采样和统计数据空间化的方式将不同数据统一到相同的格网单元,对 GEP 核算结果有一定程度的影响,因此接下来可通过研究格网单元尺度与 GEP 的空间效应来确定最佳格网尺度,从而对 GEP 实现空间分布精准核算。

参考文献(References):

[1] Assessment M E. Ecosystems and human well - being: Synthesis [J]. Physics Teacher,2005 ,34(9) :534.

[2] Costanza R, d' Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387

(15):253–260.

[3] Ouyang Z Y,Zheng H,Xiao Y,et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. Science,2016,352(6292):1455–1459.

[4] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学,2015,37(9):1740–1746.

Xie G D,Zhang C X,Zhang C S,et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science,2015,37(9):1740–1746.

[5] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报,2013,33(21):6747–6761.

Ouyang Z Y,Zhu C Q,Yang G B,et al. Gross ecosystem product: Concept,accounting framework and case study[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(21):6747–6761.

[6] Ma G X,Wang J N,Yu F,et al. Framework construction and application of China's gross economic–ecological product accounting[J]. Journal of Environmental Management,2020,264:109852.

[7] 白杨,李晖,王晓媛,等. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究[J]. 自然资源学报,2017,32(7):1100–1112.

Bai Y,Li H,Wang X Y,et al. Evaluating natural resource assets and gross ecosystem products using ecological accounting system: A case study in Yunnan Province[J]. Journal of Natural Resources,2017,32(7):1100–1112.

[8] 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[J]. 环境与可持续发展,2020,45(6):80–85.

Ouyang Z Y,Lin Y Q,Song C S. Research on gross ecosystem product(GEP):Case study of Lishui City,Zhejiang Province[J]. Environment and Sustainable Development,2020,45(6):80–85.

[9] 陈华阳,王远,黄逸敏,等. 生态承载力与生态系统生产总值耦合的生态系统服务评估——以福建省长汀县为例[J]. 水土保持学报,2021,35(5):150–160.

Chen H Y,Wang Y,Huang Y M,et al. Evaluation of regional ecosystem services grade coupling ecological carrying capacity and gross ecosystem product:A case study of Changting County,Fujian Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(5):150–160.

[10] 江仕嵘. 陕西省生态系统生产总值核算及时空演变研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2021.

Jiang S R. Gross ecosystem product accounting with its spatio-temporal evolution of Shaanxi Province[D]. Xianyang:Northwest A&F University,2021.

[11] 谢泽阳. 赣南地区生态系统生产总值时空演变及驱动力研究[D]. 南昌:南昌大学,2021.

Xie Z Y. Spatiotemporal evolution and driving forces of gross ecosystem product in southern Jiangxi Province[D]. Nanchang:Nanchang University,2021.

[12] 陈宗铸,雷金睿,吴庭天,等. 国家公园生态系统生产总值核算——以海南热带雨林国家公园为例[J]. 应用生态学报,2021,32(11):3883–3892.

Chen Z Z,Lei J R,Wu T T,et al. Gross ecosystem product accounting of national park:Taking Hainan tropical rainforest national park as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(11):3883–3892.

[13] 韩增林,赵玉青,闫晓露,等. 生态系统生产总值与区域经济耦合协调机制及协同发展——以大连市为例[J]. 经济地理,2020,40(10):1–10.

Han Z L,Zhao Y Q,Yan X L,et al. Coupling coordination mechanism and spatial-temporal relationship between gross ecosystem product and regional economy:A case study of Dalian[J]. Economic Geography,2020,40(10):1–10.

[14] 魏巍. 基于能值生态足迹方法与生态系统生产总值的青海省生态补偿量化研究[D]. 兰州:兰州大学,2020.

Wei W. The quantitative analysis on ecological compensation of Qinghai Province based on the energy ecological footprint and gross ecosystem production[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2020.

[15] 林场焱,徐昔保. 长三角地区生态系统生产总值时空变化及重要生态保护空间识别[J]. 资源科学,2022,44(4):847–859.

Lin Y Y,Xu X B. Spatiotemporal variations of gross ecosystem product and identification of important ecological protection spaces in the Yangtze River Delta[J]. Resources Science,2022,44(4):847–859.

[16] 董俐. 基于生态系统生产总值的区域生态补偿空间选择研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.

Dong L. Selection of regional ecological compensation areas based on gross ecosystem product:A case study of Zhejiang Province[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2021.

[17] Zou Z Y,Wu T,Xiao Y,et al. Valuing natural capital amidst rapid urbanization:Assessing the gross ecosystem product(GEP) of China's 'Chang-Zhu-Tan' megacity[J]. Environmental Research Letters,2020,15(12):124019.

[18] 牟雪洁,王夏晖,张箫,等. 北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化[J]. 水土保持研究,2020,27(1):265–274,282.

Mou X J,Wang X H,Zhang X,et al. Accounting and mapping of gross ecosystem product in Yanqing District,Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(1):265–274,282.

[19] 王继人,钟昌标,王玲玲,等. 2000—2017年湖南省土地耕作适宜性、气候生产潜力与LUCC过程动态特征[J]. 山地学报,2019,37(2):252–262.

Wang J R,Zhong C B,Wang L L,et al. The dynamic features of land cultivation suitability, climatic potential productivity and LUCC process from 2000 to 2017 in Hunan Province,China[J]. Mountain Research,2019,37(2):252–262.

[20] 陈晓玲,曾永年. 亚热带山地丘陵区植被NPP时空变化及其与气候因子的关系——以湖南省为例[J]. 地理学报,2016,71(1):35–48.

Chen X L,Zeng Y N. Spatial and temporal variability of the net primary production(NPP) and its relationship with climate factors in subtropical mountainous and hilly regions of China:A case study in Hunan Province[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(1):35–48.

- [21] 王盈丽,徐新良,庄大春,等.湖南省生态系统服务供需格局演变[J].生态学杂志,2021,40(10):3268–3277.
Wang Y L,Xu X L,Zhuang D C,et al. Evolution of the supply and demand pattern of ecosystem services in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(10):3268–3277.
- [22] 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[Z/OL]. 北京:中华人民共和国生态环境部,(2020–10–29)[2022–05–01]. http://www.caep.org.cn/zclm/sthjyjjhszx/zxdt_21932/202101/W020210122402035975103.pdf.
Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. The technical guideline on gross ecosystem product (GEP) [Z/OL]. Beijing:Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China,(2020–10–29)[2022–05–01]. http://www.caep.org.cn/zclm/sthjyjjhszx/zxdt_21932/202101/W020210122402035975103.pdf.
- [23] 李名升,任晓霞,于洋,等.中国大陆城市PM_{2.5}污染时空分布规律[J].中国环境科学,2016,36(3):641–650.
Li M S,Ren X X,Yu Y,et al. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in mainland China [J]. China Environmental Science,2016,36(3):641–650.
- [24] Zou B,You J W,Lin Y,et al. Air pollution intervention and life-saving effect in China[J]. Environment International,2019,125:529–541.
- [25] 任启文,王成,郅光发,等.城市绿地空气颗粒物及其与空气微生物的关系[J].城市环境与城市生态,2006,19(5):22–25.
Ren Q W,Wang C,Qie G F,et al. Airborne particulates in urban greenland and its relationship with airborne microbes [J]. Urban Environment and Urban Ecology,2006,19(5):22–25.
- [26] 郭伟.北京地区生态系统服务价值遥感估算与景观格局优化预测[D].北京:北京林业大学,2012.
Guo W. Valuation of ecosystem services based on remote sensing and landscape pattern optimization in Beijing[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2012.
- [27] 李敏.基于InVEST模型的生态系统服务功能评价研究——以北京延庆为例[D].北京:北京林业大学,2016.
Li M. Ecosystem services evaluation based on InVEST model: A case study of Yanqing,Beijing[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2016.
- [28] 徐立.土地利用变化对长沙市生态系统服务价值的影响研究[D].长沙:湖南大学,2009.
Xu L. Effects of land use change on ecosystem services value in Changsha City,China[D]. Changsha:Hunan University,2009.
- [29] 刘利花,尹昌斌,钱小平.稻田生态系统服务价值测算方法与应用——以苏州市域为例[J].地理科学进展,2015,34(1):92–99.
Liu L H,Yin C B,Qian X P. Calculation methods of paddy ecosystem service value and application: A case study of Suzhou City [J]. Progress in Geography,2015,34(1):92–99.
- [30] 段晓男,王效科,欧阳志云.乌梁素海湿地生态系统服务功能及价值评估[J].资源科学,2005,27(2):110–115.
Duan X N,Wang X K,Ouyang Z Y. Evaluation of wetland ecosystem services in Wuliangsu Hai [J]. Resources Science,2005,27(2):110–115.
- [31] 李楠,李龙伟,张银龙,等.杭州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J].浙江农林大学学报,2019,36(1):118–129.
Li N,Li L W,Zhang Y L,et al. Changes of ecosystem services value of Hangzhou Bay Coastal Wetland [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2019,36(1):118–129.
- [32] 贾芳芳.基于InVEST模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
Jia F F. InVEST model based ecosystem services evaluation with case study on Ganjiang River basin [D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2014.
- [33] 韩永伟,高吉喜,王宝良,等.黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J].农业工程学报,2012,28(17):78–85.
Han Y W,Gao J X,Wang B L,et al. Evaluation of soil conservation function and its values in major eco-function areas of loess plateau in eastern Gansu Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(17):78–85.
- [34] 江波,陈媛媛,饶恩明,等.博斯腾湖生态系统最终服务价值评估[J].生态学报,2015,34(4):1113–1120.
Jiang B,Chen Y Y,Rao E M,et al. Final ecosystem services valuation of Bosten Lake [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(4):1113–1120.
- [35] 崔丽娟,庞丙亮,李伟,等.扎龙湿地生态系统服务价值评价[J].生态学报,2016,36(3):828–836.
Cui L J,Pang B L,Li W,et al. Evaluation of ecosystem services in the Zhalong Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(3):828–836.
- [36] 石珪,王如松,黄锦楼,等.中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析[J].科学通报,2012,57(9):720–731.
Shi Y,Wang R S,Huang J L,et al. An analysis of the spatial and temporal changes in Chinese terrestrial ecosystem service functions [J]. Chinese Science Bulletin,2012,57(9):720–731.
- [37] Burnett R,Chen H,Fann N,et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2018,115(38):9592–9597.
- [38] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.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[J].地理研究,2015,34(4):691–700.
Liu Y Q,Liao L W,Long H L,et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan Province [J]. Geographical Research,2015,34(4):691–700.
- [39] 熊鹰,张方明,龚长安,等. LUCC影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1397–1408.
Xiong Y,Zhang F M,Gong C A,et al. Spatial-temporal evolution of ecosystem service value in Hunan Province based on LUCC [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(6):1397–1408.

Spatio – temporal evolution of gross ecosystem product with high spatial resolution: A case study of Hunan Province during 2000—2020

HU Chenxia^{1,2}, ZOU Bin^{1,2}, LIANG Yu¹, HE Chencheng³, LIN Zhijia³

(1. School of Geosciences and Info – Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Spatio – Temporal Information and Intelligent Services, Ministry of Natural Resources, Changsha 410083, China; 3. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

Abstract: By introducing cultural, educational, and scientific research indices and optimizing gas regulation indices, this study proposed an index system to assess the gross ecosystem product (GEP) of natural resources in Hunan Province based on the existing theories and methods for ecosystem service. This study then built a grid – based GEP model with a grid scale of 30 m × 30 m to analyze the spatio – temporal evolution of the GEP of Hunan in 2000, 2010, and 2020. The results are as follows: ① In the temporal dimension, the GEP of the province increased by 3.34×10^4 billion yuan over the past 20 years, with increased amplitude of 40.28%. The contribution of all ecosystems to the GEP was in the order of forest > farmland > grassland > wetland > city. ② In the spatial dimension, the GEP exhibited high values in western and southeastern regions and low values in central and northern regions. The GEP growth rate was higher in the Wulingshan area of western Hunan and lower in the Dongtinghu area of northern Hunan. ③ Compared with the existing research results on a grid scale of 10 km × 10 km, the GEP results with a high spatial resolution showed more details of the spatial distribution of the aquatic and urban ecosystems. ④ The contribution degrees of ecosystem function values to the GEP of Hunan changed regularly over time. The contribution of the soil conservation function value dominated the changes in the GEP of the Wulingshan and Dongtinghu areas. The results of this study provide a basis for scientific decision – making in supervising natural resources and protecting the ecological environment in Hunan Province.

Keywords: natural resources; gross ecosystem product; high spatial resolution; spatio – temporal evolution; Hunan Province

(责任编辑: 陈 理)