

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.017

张超正,孙小宇,张寒,等.基于土地利用变化的长江中游地区生态系统服务供需平衡研究[J].水土保持学报,2024,38(3):
ZHANG Chaozheng, SUN Xiaoyu, ZHANG Han, et al. Research on the supply-demand balance of ecosystem services based on land use change
in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

基于土地利用变化的长江中游地区生态系统服务供需平衡研究

张超正¹, 孙小宇², 张寒¹, 邓陈宁³, 赵可², 靳亚亚¹, 陈丹玲²

(1.西北农林科技大学经济管理学院,陕西杨凌712100;2.华中农业大学公共管理学院,武汉430070;
3.中国环境研究科学院环境基准与风险评估重点实验室,北京100012)

摘要: [目的] 揭示生态系统服务供需平衡的时空特征,并进一步探究土地利用变化对生态系统服务供需平衡的双重效应及其影响机理。[方法] 选取长江中游地区作为研究对象,引入生态系统服务供需量化矩阵分析生态系统供需平衡的时空格局,并运用土地利用变化生态贡献率模型分析土地利用变化对生态系统服务供需平衡的双重影响。[结果] (1)研究期间,长江中游地区生态系统服务供需平衡状况持续恶化,主要是由建设用地大规模扩张和耕地、林地大面积缩减带来的生态系统服务供给能力减少和消费需求增加造成的。(2)长江中游地区不同类型生态系统服务供给间的关系在时间尺度上由权衡转为协同,需求和供给平衡间的协同关系在时间尺度上进一步增强,但不同类型生态系统服务供给、需求和供需平衡间的权衡或协同性质及其程度在空间尺度上却存在高度异质。(3)长江中游地区土地利用变化对生态系统服务供需平衡存在改善和恶化双重效应,且恶化效应显著大于改善效应,但引起生态系统服务及其分项服务供需改善和恶化的土地利用变化类型具有时序异质性。[结论] 应促进具有协同改善生态系统服务供需平衡的用地类型,提升与区域主体生态系统服务功能一致的土地利用类型,以及遏制具有协同恶化生态系统服务供需平衡的土地利用变化类型,以实现区域生态系统服务供需改善。

关键词: 生态系统服务; 供需平衡; 土地利用变化; 长江中游地区

中图分类号:X171.1 文献标识码:A

Supply-Demand Balance of Ecosystem Services in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on Land Use Change

ZHANG Chaozheng¹, SUN Xiaoyu², ZHANG Han¹, DENG Chenning³,

ZHAO Ke², JIN Yaya¹, CHEN Danling²

(1. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 3. Key Laboratory of Environmental Standards and Risk Assessment, Chinese Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510613)

Abstract: [Objective] This study was aimed to reveal the spatio-temporal characteristics of supply-demand balance of ecosystem services, and further to explore the dual effects and influencing mechanisms of land use change on the supply-demand balance of ecosystem services. [Methods] Taking the middle reaches of the Yangtze River as the research area and setting 2000—2018 as the research period, the quantitative matrix of supply-demand of ecosystem services was employed to analyze the spatio-temporal characteristics of the supply-demand balance of ecosystem service, and the ecological contribution rate of land use change was introduced to analyze the influencing mechanisms of land use change on the supply-demand balance of ecosystem services. [Results] (1) During the study period, the supply-demand balance of ecosystem services in the middle reaches of the Yangtze River had been continuously deteriorating, which was mainly caused by the large-scale expansion of construction land and the large-scale reduction of cultivated land and forest land,

收稿日期:2023-10-17 修回日期:2023-12-14 录用日期:2024-01-20 网络首发日期(www.cnki.net):2024-03-04

资助项目:国家自然科学基金项目(42101307,42101263);教育部人文社会科学研究项目(21YJC630174);西北农林科技大学博士科研启动基金项目(2452023038);陕西省社会科学基金项目(2021R023);陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0265)

第一作者:张超正(1993—),男,湖南郴州人,博士,讲师,主要从事土地利用变化研究。E-mail:weirdozcz@163.com

通信作者:陈丹玲(1993—),女,江苏徐州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事土地资源管理研究。E-mail:hustcdl@163.com

resulting in the decrease of supply capacity and the increase of consumption demand of ecosystem services. (2) The relationship between different supply of ecosystem services had changed from trade-off to synergy in time scale, and the synergy between different demand and supply-demand balance of ecosystem services had been further enhanced on the time scale, but the trade-off or synergy between supply, demand, and supply-demand balance was highly heterogeneous on the spatial scale. (3) Land use change in the MRYR had dual effects on the supply-demand balance of ecosystem services, and the deterioration effect was significantly larger than the improvement effect, but the types of land use change that cause the improvement and deterioration of supply-demand of ecosystem services and their sub-services had temporal heterogeneity. **[Conclusion]** Promote types of land use change that could improve the supply-demand balance of ecosystem services; promote types of land use change that are compatible with key ecosystem services; and curb types of land use change that would worsen the supply-demand balance of ecosystem services, in order to increase the sustainability of ecosystem services and improve the quality of the ecological environment.

Keywords: ecosystem services; supply-demand balance; land use change; middle reaches of the Yangtze River

Received: 2023-10-17

Revised: 2023-12-14

Accepted: 2024-01-20

Online(www.cnki.net): 2024-03-04

生态系统服务同时包含供给与需求2个层次,且从供需关系视角来看,生态系统服务的本质即自然生态系统作为供给主体,人类社会系统作为需求主体^[1-2]。生态系统服务供需平衡反映的是生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统的匹配或平衡状态^[3-5]。区域生态环境问题的实质是生态系统服务供需关系的空间差异或失衡,即人类社会系统的消费需求超过自然生态系统的供给水平,又未能通过有效价值反馈促进形成供给增量,导致负向交互机制,进一步加剧系统间的矛盾^[6-8]。然而,生态系统服务前期集中于生态系统服务的供给研究,近年来,才开始重视生态系统服务的需求和供需平衡研究^[9-11]。生态系统服务供需平衡的量化测度、时空格局、驱动机理以及福祉效应研究,逐渐成为全球环境变化可持续科学的研究热点问题和前沿领域^[12-15]。但是,现有研究存在两个方面的问题和不足,有待进一步的深入和拓展。一方面,由于生态系统服务供给和需求存在量纲不同的问题,绝大部分研究侧重于生态系统服务供需相对平衡,致使研究结果缺乏可比性,且对政策管理和决策过程的支持作用有限^[2,15]。基于土地利用类型的生态系统服务供需量化矩阵为测度生态系统服务供需绝对平衡提供一种快速有效的方法,但学者们^[14-17]大多运用此方法来量化生态系统服务供给、需求和供需关系的空间格局,未能进一步揭示土地利用变化对区域生态系统服务供需平衡的双重效应及其机理,从而为通过调控土地利用变化实现区域生态环境改善提供参考;另一方面,生态系统服务供需平衡状态随着区域经济社会发展阶段的转型而演变^[7],

但大多数研究忽视区域经济社会发展阶段的综合评估,未能建立区域生态系统服务供需平衡变化和经济社会发展阶段演变的关联,对推动区域生态系统综合管理的作用较为有限。应从区域经济社会发展阶段识别及其转型过程划分入手,强化对区域生态系统服务供需平衡“时空格局—驱动机制—模拟预测—优化调控”的系统研究与综合分析。

长江中游地区在中国经济社会发展、粮食安全保障、农业农村发展以及生态环境建设方面承担重要职能,具有重要的战略地位。进入2000年以来,随着中部崛起、长江经济带等重大战略的相继实施、叠加发力,长江中游地区经历快速的城镇化与工业化进程,建设用地大规模扩张和耕地、生态用地大幅度缩减带来的生态系统服务供给能力锐减与消费需求激增,不仅加剧生态系统服务供需水平的空间异质和供需恶化的持续蔓延,也进一步导致生态系统服务可持续性降低和居民福祉受损^[7,18]。基于此,以长江中游地区作为研究靶区和2000—2018年作为研究时段,通过构建基于土地利用类型的生态系统服务供需量化矩阵,揭示生态系统服务供需平衡的时空特征;引入土地利用变化生态贡献率模型,深入探究土地利用变化对生态系统服务供需平衡的双重效应及其影响机理,以期为促进长江中游地区和其他区域土地资源优化配置和生态系统综合管理提供科学依据与决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

基于行政一体化的视角,长江中游地区地跨湖北、湖南和江西三省全境325个县(市)区,总面积为

56.46万km²(图1)。以工业化和城镇化阶段理论为基础,结合对区域GDP增长率、人均GDP、产业结构、就业结构、人口增长率、人口城镇化等指标的演变历程分析发现,长江中游地区2000—2018年经济社会发展阶段存在2次显著的转型过程,即由初级产品生产阶段Ⅱ期向工业化中期转型,城镇化缓慢发展与人口严重外流期(2000—2010年);工业化中期向工业化后期转型,城镇化稳步发展与人口持续回流期(2010—2018年)。由于长江中游地区经济社会发展阶段存在转型过程,由此必定带来不同的土地利用问题和生态环境问题,适时开展长江中游地区生态系统服务供需平衡对土地利用变化的时空响应研究,是促进区域协调发展、服务国家发展战略的重要体现。

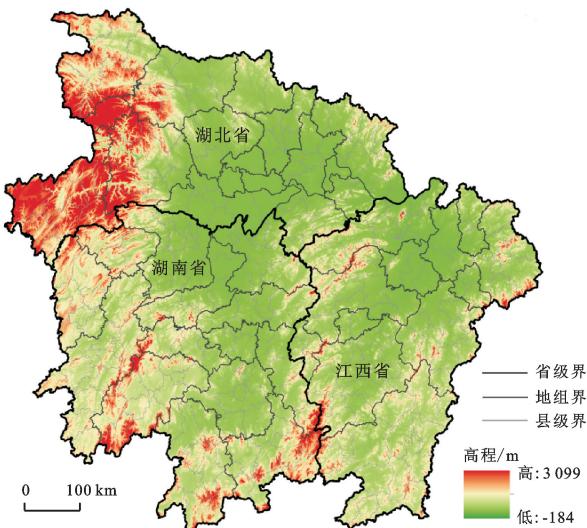


图1 长江中游地区地理区位

Fig. 1 Geographical location of the middle reaches of the Yangtze River (MRYR)

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统服务供需量化矩阵 Burkhard等^[18]率先提出基于土地利用类型的生态系统服务供需量化矩阵,可为量化生态系统服务供给平衡提供一种简单、快速且有效的方法。这种半定量的方法具有以下明显的优势:一是解决生态系统服务供需与需求之间量纲不一致的问题,使得生态系统服务供需绝对平衡的量化成为可能;二是数据需求少,特别适用于生态系统服务供需评估较为复杂的中、大尺度区域,对小尺度区域也同样适用;三是可根据研究需求,通过修正土地利用类型、调整生态系统服务分类、邀请专家重新方法等多种方式进行修正;四是可用来探究区域生态环境整体或生态环境要素对土地利用变化的响应,为通过调控土地利用变化实现区域生态环境改善提供一定依据;五是虽然不能将生态系统服务供需完全刻画,但可将生态系统服务供需的变化趋势完

全地表现出来,为缓解长江中游地区以及其他快速城镇化和工业化地区生态系统服务供需矛盾提供一定的科学依据^[15,18-20]。该方法已成功地应用于多个案例,对推动生态系统服务理念从理论研究走向管理实践具有重要作用。为提高生态系统服务供需量化矩阵的适用性,Chen等^[7]对1995—2015年长江中游地区土地利用二级类型的生态系统服务供给能力/需求水平进行打分,由于研究区域一致且研究时段相近,因而主要参照其研究成果。其主要思路和具体步骤为:

第一,修正土地利用类型体系。基于中国20世纪LUCC时空平台所设置的分类体系,比对Burkhard等采用的欧洲委员会的CORONE分类体系,结合长江中游地区实际进行相应的地类归并与调整。

第二,调整生态系统服务分类。考虑到生态完整性不属于最终服务,只针对供给、调节和文化服务3大类23小类进行供给/需求水平打分。

第三,邀请相关专家进行打分。邀请17位对长江中游地区比较熟悉的专家对该区域土地利用二级类型的生态系统服务供给和需求水平进行0~5之间的赋值,0,1,2,3,4,5分别表示无相关、极低水平、低水平、中等水平和极高水平的生态系统服务供给/需求,最终打分可参见Chen等^[7]的研究成果。

第四,确定生态系统服务供需量化矩阵。依据土地利用二级类型面积占比,加权计算区域土地利用一级类型的生态系统服务供给/需求水平。

第五,计算生态系统服务供给、需求和供需差得分体系。结合土地利用一级类型面积,计算生态系统服务供给、需求和供需差得分体系,通过两期得分体系的差分可判断生态系统服务供给、需求和供需平衡的变化情况。限于文章篇幅和研究重点,仅列示生态系统服务供需差得分体系的计算公式。具体计算公式为:

$$\begin{aligned} ESSD_k &= \sum_f A_k \times SD_{kf} \\ ESSD_f &= \sum_k A_k \times SD_{kf} \\ ESSD &= \sum_k \sum_f A_k \times SD_{kf} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:ESSD_k、ESSD_f和ESSD分别为第k类土地生态系统服务供需差得分、第f类生态系统服务供需差得分和生态系统服务总供需差得分;A_k为第k类土地的面积(km²);SD_{kf}为k类土地单位面积上第f项生态系统服务的供需差。生态系统服务供需平衡根据生态系统服务供给量减需求量的差值的变化量加以判断,其中变化量<0、=0、>0分别表示供需恶化、供需不变、供需改善。

1.2.2 土地利用变化生态贡献率 土地利用变化贡

贡献率常被用来土地利用类型相互转化所导致的区域生态环境质量或生态系统服务价值的改变,从而确定造成区域生态环境改善或恶化的主导因子^[21]。因此,引入此方法来量化某一土地利用变化类型所导致的生态系统服务供需差的变化,并将导致生态系统供需改善和恶化的土地利用变化生态贡献率分开计算,从而确定引起区域生态环境改善和恶化的主导因子。具体计算为:

$$CV = (SD_j - SD_i) \times N_{ij} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

$$CR = \frac{(SD_j - SD_i) \times N_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n N_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中:CV 和 CR 分别为土地利用变化类型的生态系统服务供需差变化量和贡献率;SD_j 和 SD_i 分别为第 j 种和第 i 种土地利用类型的供需差(km²);N_{ij} 为初期的第 i 种土地利用类型转化为末期第 j 种土地利用类型的面积(km²)。

1.3 数据来源

所用数据包括土地利用、行政边界和社会经济数据。土地利用数据包括 2000 年、2010 年和 2018 年 3 期,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m。长江中游地区 3 期土地利用数据的分类体系完全相同,即 6 个 1 级类型和 19 个 2 级类型。根据研究需要,将研究区土地利用 1 级类型重划为耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地以及未利用地 7 种,并分别编码为

1,2,3,4,5,6,7。行政边界数据包括湖北、湖南和江西 3 省省级、市级和县级行政边界,来源于国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)。为便于开展研究,对各市市辖区以及难以获取完整数据资料的县域单元进行合并,最后共得到 261 个县域单元。社会经济数据包括人口、产值、就业等数据,来源于《中国统计年鉴》^[22] 和 3 省统计年鉴^[23-25],所有产值类数据均以 2000 年为基期进行平减处理。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务供给、需求和供需平衡的时空特征

2.1.1 生态系统服务供给的时空特征 表 1 为长江中游地区 2000—2018 年 2 种分类标准视角下生态系统服务供给变化。就土地利用类型分类标准来看,长江中游地区生态系统服务供给总量呈不断减少趋势,且 2010—2018 年减少量远大于 2000—2010 年;2000—2010 年生态系统服务供给总量减少主要是耕地和草地面积减少所致,而 2010—2018 年主要是林地、湿地和耕地面积减少所致。就生态系统服务类型分类标准来看,2000—2010 年生态系统服务总供给减少主要是由供给服务供给减少所致,而 2010—2018 年则主要是由调节和供给服务供给减少所致;2000—2010 年供给和调节服务供给增加而文化服务供给减少,2000—2018 年 3 项服务供给同步减少,即不同类型生态系统服务供给变化在时间尺度上由权衡关系转变为协同关系。

表 1 长江中游地区 2000—2018 年生态系统服务供给变化

Table 1 Change of ecosystem service supply in the MRYR during 2000—2010 Unit: × 10⁴

分类标准	2000 年	2010 年	2018 年	2000—2010 年	2010—2018 年	2000—2018 年
基于土地利用类型	耕地	572.61	555.42	550.97	-17.19	-4.44
	林地	2 556.76	2561.68	2 545.61	4.92	-16.07
	草地	117.44	111.04	113.00	-6.40	1.95
	水域	116.07	121.40	124.65	5.32	3.25
	湿地	24.70	27.71	22.95	3.01	-4.76
	建设用地	4.66	6.45	8.02	1.79	1.57
基于生态系统服务类型	未利用地	0.06	0.07	0.06	0	0
	供给服务	1 177.17	1 170.67	1 164.22	-6.50	-6.45
	调节服务	1 603.85	1 600.37	1 590.77	-3.48	-9.60
	文化服务	611.28	612.73	610.28	1.45	-2.45
合计	3 392.30	3 383.77	3 365.27	-8.54	-18.49	-27.03

图 2 为长江中游地区 2000—2018 年生态系统服务供给变化的空间格局与演化过程。长江中游地区生态系统服务总供给及其分项服务供给总体在减少,局部在增加。武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等城市群较为集中的地区生态系统服务供给减少较为明显,进而加剧整个区域生态系统服务供给减少。然而,3 项服务供给的增加区或减少区在空间

上并不一致,即不同类型生态系统服务供给权衡与协同性质及其程度在空间尺度上存在高度异质。

2.1.2 生态系统服务需求的时空特征 表 2 为长江中游地区 2000—2018 年 2 种分类标准视角下生态系统服务需求变化。就土地利用类型分类标准来看,长江中游地区生态系统服务总需求呈不断增加趋势,且 2010—2018 年增加量大于 2000—2010 年增加量;

2000—2010年生态系统服务总需求增加主要是建设用地增加而耕地、草地减少所致,2010—2018年主要是建设用地增加而耕地、林地、湿地减少所致。

2个阶段均表明,建设用地变化对生态系统服务需求变化的贡献最大,而建设用地大面积扩张的根源在于经济快速发展和人口急剧增长;2000—2010年和2010—2018年3项服务需求均表现为同步增加,

即不同类型生态系统服务需求在时间尺度上以协同关系为主。就生态系统服务类型分类标准来看,2000—2010年和2010—2018年生态系统服务总需求均主要是由供给服务需求增加所致,但其贡献有所下降;2个阶段3项服务需求均表现为同步增加,即不同类型生态系统服务需求在时间尺度上以协同关系为主。

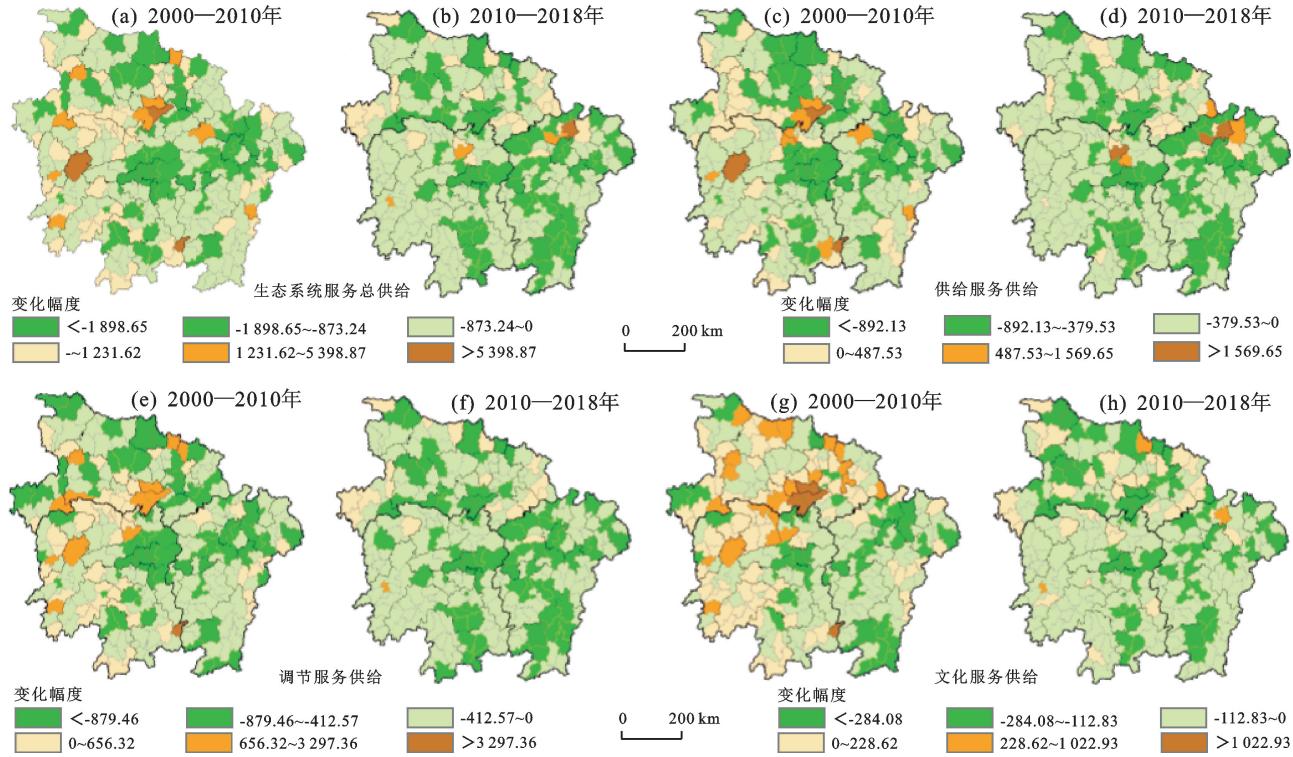


图2 长江中游地区2000—2018年生态系统服务供给变化的空间分异

Fig. 2 Spatial differentiation of ecosystem service supply change within the MRYR during 2000—2018

表2 长江中游地区2000—2018年生态系统服务需求变化

Table 2 Changes of ecosystem service demand in the MRYR during 2000—2018 Unit: $\times 10^4$

分类标准	2000年	2010年	2018年	2000—2010年	2010—2018年	2000—2018年
基于土地利用类型	耕地	495.74	480.86	477.01	-14.88	-3.85
	林地	100.66	100.85	100.22	0.19	-0.63
	草地	2.20	2.08	2.11	-0.12	0.04
	水域	30.63	32.04	32.90	1.41	0.86
	湿地	5.41	6.07	5.03	0.66	-1.04
	建设用地	79.04	109.36	136.02	30.32	26.67
基于生态系统服务类型	未利用地	0	0	0	0	0
	供给服务	292.39	292.39	292.39	292.39	292.39
	调节服务	410.43	410.43	410.43	410.43	410.43
	文化服务	10.86	10.86	10.86	10.86	10.86
合计	3 392.30	713.68	713.68	713.68	713.68	713.68

图3为长江中游地区2000—2018年生态系统服务需求变化的空间格局与演化过程。长江中游地区生态系统服务总需求及其分项服务需求总体在增加,局部在减少。武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等城市群较为集中的地区生态系统服务需求

增加较为明显,进而加剧整个区域生态系统服务需求增加。

3项服务需求的增加区或减少区在空间上不一致,即不同类型生态系统服务供给权衡与协同性质及其程度在空间尺度上存在高度异质。

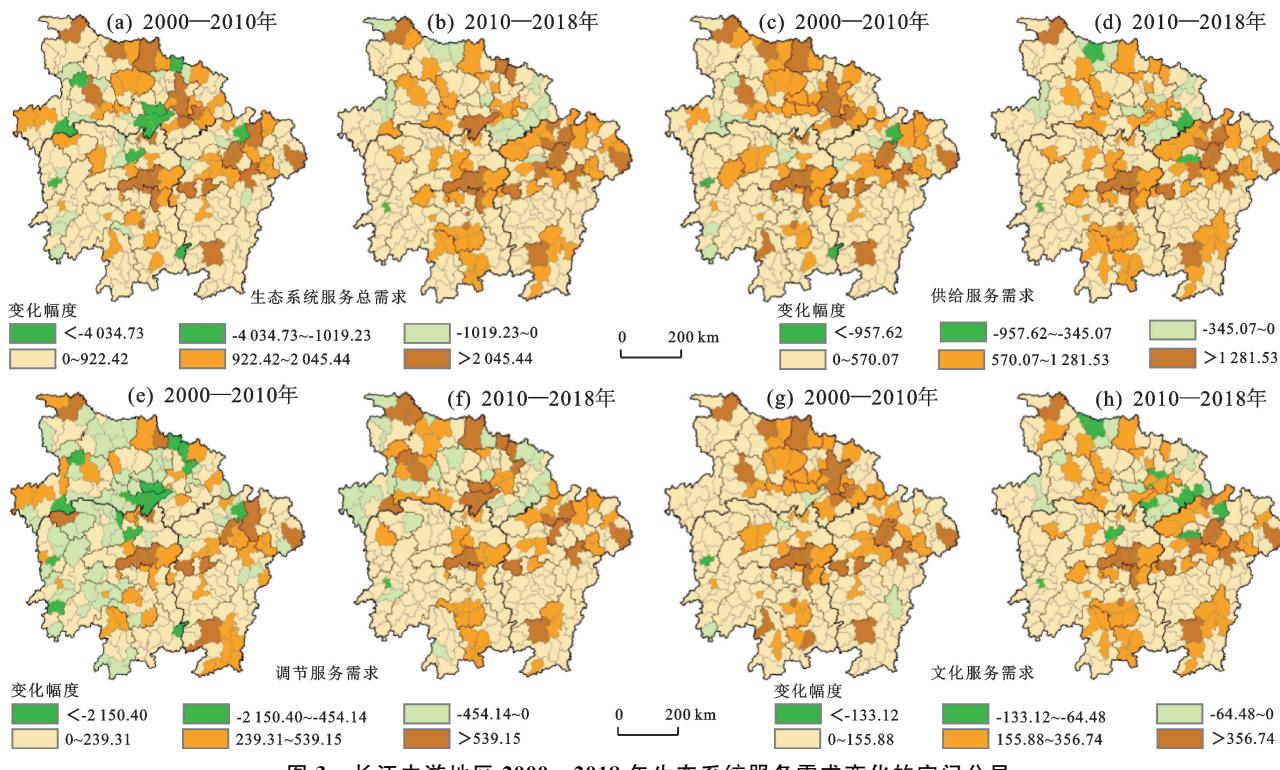


图3 长江中游地区2000—2018年生态系统服务需求变化的空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation of ecosystem service demand change within the MYRY during 2000—2018

2.1.3 生态系统服务供需平衡的时空特征 表3为长江中游地区2000—2018年2种分类标准视角下生态系统服务供需差变化。就土地利用类型分类标准来看,长江中游地区生态系统服务总供需差呈不断扩大的趋势,且2010—2018年减少量远大于2000—2010年减少量,表明长江中游地区生态系统服务供需失衡现象进一步加剧;2000—2010年生态服务供需恶化主要是建设用地增加而草地、耕地减少所致,而2010—2018年主要是建设用地增加而林地、草地、耕地、湿地减少所致;生态系统服务总供给远大于总需求,表明长江中游地区生态系统服务可承载性仍处

于较高水平。与2000—2010年相比,2010—2018年经济快速发展和人口持续回流引发生态系统服务消费需求激增,而不断扩张的建设用地因大面积吞噬耕地、生态用地导致生态系统服务供给能力锐减,造成长江中游地区生态系统服务供需平衡不断恶化。

就生态系统服务类型分类标准来看,2000—2010年和2010—2018年均主要是供给服务供需差恶化所致,但其贡献由77.62%下降至48.15%;2个阶段3项生态系统服务供需差均表现为同步减少,即不同类型生态系统服务供需差在时间尺度上以协同关系为主。

表3 长江中游地区2000—2018年不同土地利用类型生态系统服务供需差变化

Table 3 Changes of ecosystem service supply-demand balance in the MYRY during 2000—2018 Unit: $\times 10^4$

分类标准	2000年	2010年	2018年	2000—2010年	2010—2018年	2000—2018年
基于土地利用类型	耕地	76.87	74.56	73.96	-2.31	-0.60
	林地	2 456.10	2 460.83	2 445.39	4.73	-15.44
	草地	115.24	108.97	110.89	-6.28	1.92
	水域	85.44	89.36	91.75	3.92	2.40
	湿地	19.28	21.64	17.92	2.35	-3.71
	建设用地	-74.38	-102.91	-128.00	-28.53	-25.09
基于生态系统服务类型	未利用地	0.06	0.07	0.06	0	0
	供给服务	884.78	864.51	845.00	-20.27	-19.52
	调节服务	1 193.42	1 190.18	1 175.06	-3.23	-15.12
	文化服务	600.42	597.81	591.92	-2.61	-5.89
合计	2 678.62	2 652.51	2 611.98	-26.11	-40.53	-66.64

图4为长江中游地区2000—2018年生态系统服务供需平衡变化的空间格局与演化过程。长江中游

地区生态系统服务供需及其分项服务供需总体在恶化,局部在改善。武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳

湖城市群等城市群较为集中的地区对生态系统服务的消费需求不断增加,同时,由于区域生态系统服务的供给能力较为有限,进而加剧整个区域生态系统服

务供需失衡。3项服务供需差的增加区或减少区在空间上不一致,即不同类型生态系统服务供需平衡的权衡与协同性质及其程度在空间尺度上存在高度异质。

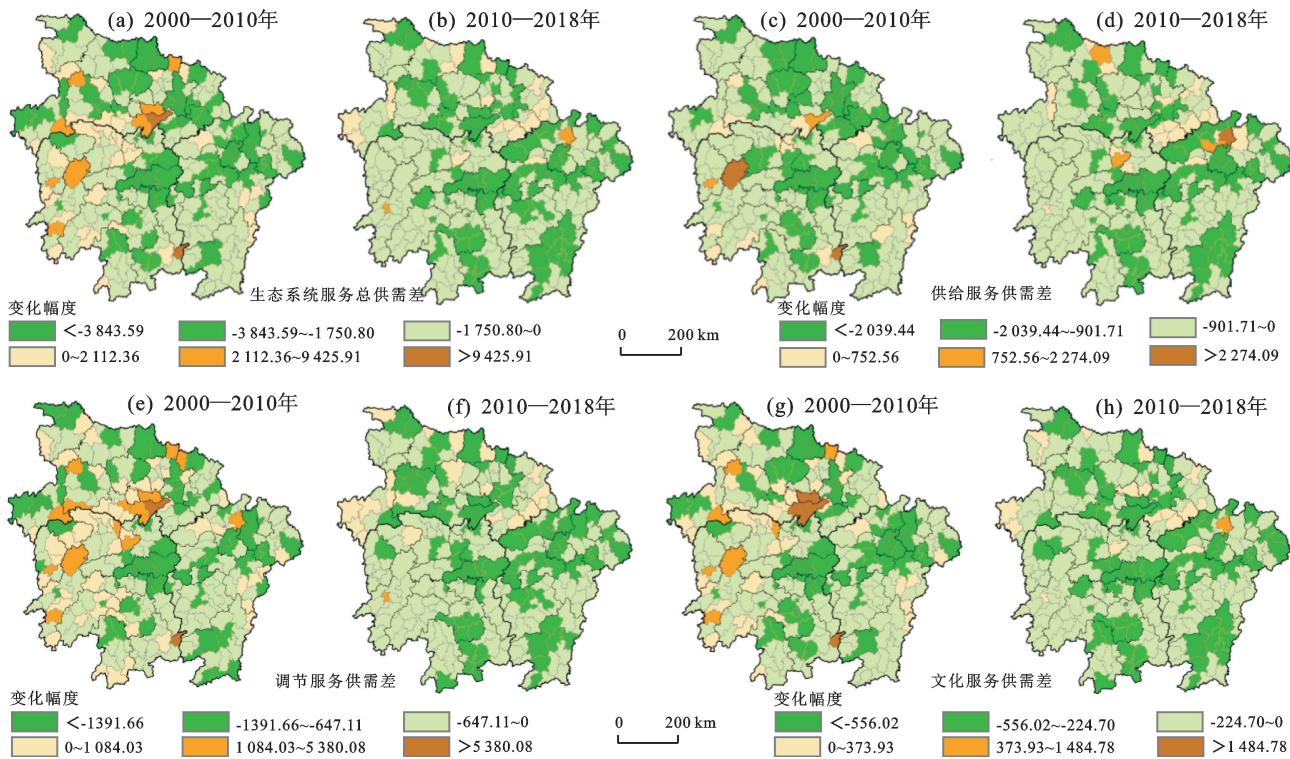


图4 长江中游地区2000—2018年生态系统服务供需平衡变化的空间分异

Fig. 4 Spatial differentiation of ecosystem service supply-demand budget change within the MRYR during 2000–2018

2.2 生态系统服务供需平衡对土地利用变化的时空响应

2.2.1 2000—2010年生态系统服务供需平衡对土地利用变化的时空响应 土地利用变化对生态系统服务供需平衡具有改善和恶化双重效应,二者在一定程度上相互抵消,使生态系统服务供需在总体上维持相对平衡,但并不意味着生态系统服务供需没有发生动态变化。将生态系统服务总供需差及其分项服务供需差变化量 >0 、 $=0$ 、 <0 的区域分别定义为生态系统服务供需改善区、维持区、恶化区。长江中游地区2000—2010年共有42种具有时空异质性的土地利用变化类型,导致生态系统服务供需改善和恶化的土地利用变化均为21种,且土地利用变化以导致生态系统服务供需恶化为主。

在引起生态系统服务供需改善的土地利用变化过程中(表4),“耕地→林地”和“耕地→水域”的累计贡献率为74.02%,表明通过实施退耕还林、退田还湖等生态环境保护与修复工程,增加林地和湿地、适当调整耕地比例,可有效改善生态环境。“建设用地→耕地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为10.88%,表明建设用地复垦复绿可在一定程度上改善生态环境和保障粮食安全。“草地→林地”的贡献率为5.38%,表明防护林建设的实施同样可在一定程度上

改善区域生态环境。在引起单项生态系统服务供需改善土地利用变化过程中,第一,就供给服务供需改善而言,“耕地→林地”和“耕地→水域”的累计贡献率为47.68%。“建设用地→耕地”“草地→林地”和“湿地→水域”的贡献率分别为20.95%,9.34%,7.35%。第二,就调节服务供需改善而言,“耕地→林地”“耕地→水域”和“耕地→草地”的累计贡献率为83.75%。“草地→林地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为6.72%。第三,就文化服务供需改善而言,“耕地→林地”“耕地→水域”和“耕地→草地”的累计贡献率为79.70%。“草地→林地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为6.28%。

在导致生态系统服务供需恶化的土地利用变化过程中(表5),“耕地→建设用地”“林地→建设用地”和“水域→建设用地”的累计贡献率为48.44%,表明在长江中游地区工业化与城镇化快速推进背景下,建设用地规模急剧扩张,耕地、草地面积大幅缩减,对区域生态环境造成较为严重的负面效应。“林地→耕地”和“水域→耕地”累计贡献率为39.90%,表明在保障粮食安全和追求经济利益双重驱动下,长江中游地区大量林地和部分水域被开发利用成耕地。“水域→建设用地”的贡献率为2.08%。在导致单项生态系统

服务供需恶化的土地利用变化过程中,第一,就供给服务供需恶化而言,“耕地→建设用地”“林地→建设用地”和“水域→建设用地”累计贡献率为71.73%。“林地→耕地”和“水域→湿地”的贡献率分别为14.77%,5.66%。第二,就恶化调节服务供需差而言,“林地→耕地”和“水域→耕地”的累计贡献率为

56.23%。“林地→建设用地”和“耕地→建设用地”的累计贡献率为27.94%。“林地→水域”的累计贡献率为3.55%。第三,就恶化文化服务供需差而言,“林地→耕地”“水域→耕地”和“湿地→耕地”的累计贡献率为46.74%。“耕地→建设用地”和“林地→建设用地”的累计贡献率为42.82%。

表4 长江中游地区2000—2010年生态系统服务供需改善的情形

Table 4 The situation of supply—demand improvement of ecosystem services in the MRYR during 2000—2010

供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%	供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%
总供需差	12	6 194.67	43.72	61.31	供给服务	12	6 194.67	6.85	40.06
	14	2 458.08	9.07	12.71		61	718.70	3.58	20.95
	61	718.70	5.22	7.32		32	1 711.46	1.60	9.34
	32	1 711.46	3.84	5.38		14	2 458.08	1.30	7.62
	62	177.18	2.54	3.56		54	1 127.25	1.26	7.35
	合计	11 260.09	64.38	90.28		合计	12 210.16	14.59	85.32
调节服务	12	6 194.67	30.47	69.18	文化服务	12	6 194.67	6.40	54.32
	14	2 458.08	5.06	11.49		14	2 458.08	2.70	22.95
	32	1 711.46	1.85	4.21		32	1 711.46	0.39	3.27
	供需差	13	353.81	1.36		供需差	13	353.81	0.29
	62	177.18	1.10	2.51		62	177.18	0.36	3.01
	合计	10 895.20	39.84	90.47		合计	10 895.20	10.13	85.98

表5 长江中游地区2000—2010生态系统服务供需恶化的情形

Table 5 The situation of supply—demand deterioration of ecosystem services in the MRYR during 2000—2010

供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%	供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%
总供需差	21	4 986.73	-35.19	36.15	供给服务	16	3 473.58	-17.31	46.35
	16	3 473.58	-25.24	25.92		26	1 389.22	-8.46	22.65
	26	1 389.22	-19.90	20.44		21	4 986.73	-5.52	14.77
	41	990.78	-3.65	3.75		45	1 894.99	-2.11	5.66
	46	185.09	-2.03	2.08		46	185.09	-1.02	2.73
	合计	11 025.40	-86.00	88.34		合计	11 929.61	-34.42	92.16
调节服务	21	4 986.73	-24.52	51.91	文化服务	21	4 986.73	-5.15	35.83
	26	1 389.22	-8.65	18.31		16	3 473.58	-3.37	23.46
	16	3 473.58	-4.55	9.63		26	1 389.22	-2.78	19.36
	供需差	41	990.78	-2.04		41	990.78	-1.09	7.58
	24	586.07	-1.68	3.55		51	493.60	-0.48	3.33
	合计	11 426.38	-41.44	87.72		合计	11 333.91	-12.88	89.56

图5为长江中游地区2000—2010年生态系统服务供需平衡变化。长江中游地区生态系统服务及其分项服务供需维持区的空间分布最为广泛,恶化区的空间分布相对分散,改善区的空间分布相对集中。生态系统服务、供给服务和文化服务供需改善区主要分布于江汉平原、大别山区、罗霄山区以及武夷山区;调节服务改善区的分布与生态系统服务供需改善区在鄱阳湖区和洞庭湖区不一致。生态系统服务及其分项服务供需恶化区主要分布在武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等城市群较为集中的区域。

2.2.2 2010—2018年生态系统服务供需平衡对土地利用变化的时空响应 长江中游地区2010—2018年共有42类具有时空异质性的土地利用变化类型,导致生态系统服务供需改善和恶化的土地利用变化均为21种,且土地利用变化同样以导致生态系统服务供需恶化为主。

在引起生态系统服务供需改善的土地利用变化过程中(表6),“建设用地→耕地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为48.33%。与上一阶段相比,“建设用地→耕地”贡献率由第3位上升至第1位,“建设

用地→林地”的贡献率则由第5位上升至第3位。“耕地→林地”和“耕地→水域”的累计贡献率为30.40%。与上一阶段相比,“耕地→林地”的贡献率由第1位下降至第2位,“耕地→水域”贡献率则由第2位下降至第4位。“湿地→水域”的贡献率为7.05%,且与上一阶段相比,其贡献率由第9位上升至第5位。在引起单项生态系统服务供需改善的土地利用变化过程中,第一,就供给服务供需改善而言,“建设用地→耕地”“建设用地→林地”和“建设用地→水域”的累计贡献率

为65.43%。“湿地→水域”和“耕地→林地”的贡献率分别为17.98%和7.55%。第二,就调节服务供需改善而言,“耕地→林地”“耕地→水域”的累计贡献率为47.15%。“建设用地→林地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为30.71%。“水域→林地”的贡献率为5.50%。第三,就文化服务供需改善而言,“建设用地→林地”和“建设用地→林地”的累计贡献率为42.65%。“耕地→林地”和“耕地→水域”的累计贡献率为36.91%。“湿地→水域”的贡献率为6.34%。

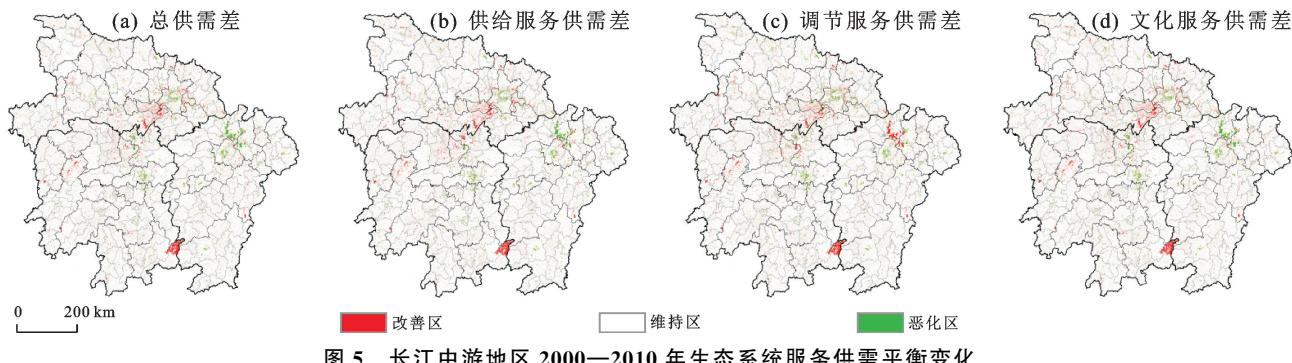


图5 长江中游地区2000—2010年生态系统服务供需平衡变化

Fig. 5 Geo-spectrum of supply-demand balance change of ecosystem services in the MRYR during 2000—2010

表6 长江中游地区2010—2018年生态系统服务供需改善的情形

Table 6 The situation of supply—demand improvement of ecosystem services in the MRYR during 2010—2018

供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%	供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%
总供需差	61	989.63	7.19	31.23	供给服务供需差	61	989.63	4.93	46.32
	12	727.25	5.13	22.29		54	1 716.57	1.91	17.98
	62	274.84	3.94	17.10		62	274.84	1.67	15.72
	14	506.42	1.87	8.11		12	727.25	0.80	7.55
	54	1 716.57	1.62	7.05		64	65.51	0.36	3.39
合计		4 214.71	19.75	85.77	合计		3 773.80	9.69	90.96
调节服务供需差	12	727.25	3.58	36.51	文化服务供需差	61	989.63	0.96	27.11
	62	274.84	1.71	17.47		12	727.25	0.75	21.19
	61	989.63	1.30	13.24		14	506.42	0.56	15.72
	14	506.42	1.04	10.64		62	274.84	0.55	15.54
	42	188.21	0.54	5.50		54	1 716.57	0.22	6.34
合计		2 686.34	8.17	83.36	合计		4 214.71	3.04	85.90

在导致生态系统服务供需恶化的土地利用变化过程中(表7),“林地→建设用地”“耕地→建设用地”和“水域→建设用地”的累计贡献率高达75.52%。与上一阶段相比,“林地→建设用地”的贡献率由第3位上升至第1位,“耕地→建设用地”和“水域→建设用地”则分别保持在第2位和第5位。“林地→耕地”和“水域→耕地”的累计贡献率达到15.27%。与上一阶段相比,“林地→耕地”的贡献率由第1位下降至第3位,“水域→耕地”的贡献率则保持在第4位。在导致单项生态系统服务供需恶化的土地利用变化过程中,第一,就供给服务供需恶化而言,“耕地→建设用地”“林地→建设用地”“水域→建设用地”和“草地→建设用地”的

累计贡献率为89.27%。“林地→耕地”的贡献率为3.41%。第二,就调节服务供需恶化而言,“林地→建设用地”“耕地→建设用地”“草地→建设用地”的累计贡献率为61.73%。“林地→耕地”和“水域→耕地”的累计贡献率为25.38%。第三,文化服务供需恶化而言,“林地→建设用地”“耕地→建设用地”“水域→建设用地”的累计贡献率为70.69%;“林地→耕地”和“水域→耕地”的累计贡献率为20.10%。图6为长江中游地区2010—2018年生态系统服务供需平衡变化。长江中游地区生态系统服务总供需差及其分项服务供需差维持区的空间分布最为广泛,恶化区的空间分布相对集中,改善区的空间分布相对分散。生态系统服务、供给服

务和文化服务供需改善区零星分布在武陵山区、幕阜山区、罗霄山区、汉江中游平原以及鄂东沿江平原;调节服务供需改善区的分布与生态系统服务供需改善区

在鄱阳湖区和洞庭湖区不一致。生态系统服务及其分项服务供需恶化区主要分布在武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等城市群较为集中的区域。

表7 长江中游地区2010—2018年生态系统服务供需恶化的情形

Table 7 The situation of supply-demand deterioration of ecosystem services in the MYRY during 2010—2018

供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%	供需情况	编码	面积/km ²	供需差变化量/ (×10 ⁴)	贡献率/%
总供需差	26	1 727.68	-24.74	38.90	供给服务供需差	16	2 952.17	-14.71	48.75
	16	2 952.17	-21.45	33.71		26	1 727.68	-10.52	34.86
	21	930.85	-6.57	10.33		21	930.85	-1.03	3.41
	41	851.88	-3.14	4.94		46	169.00	-0.93	3.09
	46	169.00	-1.85	2.91		36	150.53	-0.78	2.57
合计		6 631.58	-57.75	90.78	合计		5 930.23	-27.97	92.68
调节服务供需差	26	1 727.68	-10.76	43.13	文化服务供需差	26	1 727.68	-3.46	36.65
	21	930.85	-4.58	18.35		16	2 952.17	-2.87	30.34
	16	2 952.17	-3.87	15.50		21	930.85	-0.96	10.18
	41	851.88	-1.75	7.03		41	851.88	-0.94	9.92
	36	150.53	-0.77	3.10		46	169.00	-0.35	3.70
合计		6 613.12	-21.73	87.11	合计		6 631.58	-8.58	90.79

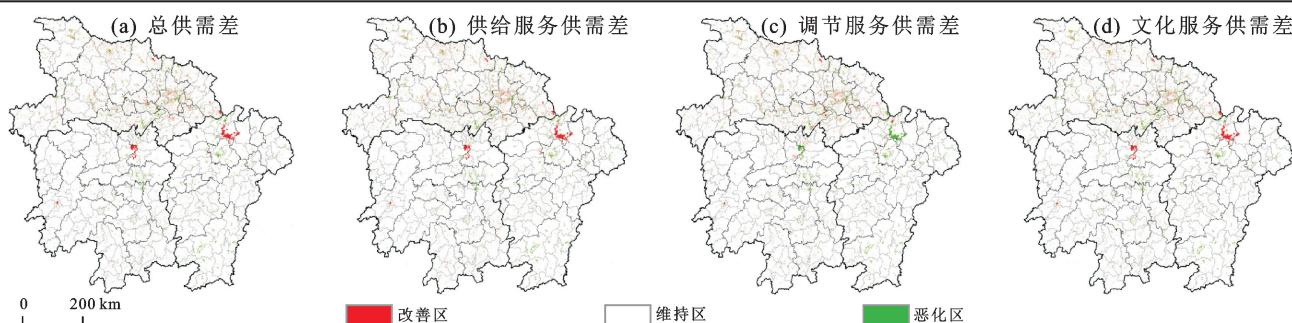


图6 长江中游地区2000—2018年生态系统服务供需平衡变化

Fig. 6 Geo-spectrum of supply-demand balance change of ecosystem services in the MYRY during 2010—2018

3 讨论

基于土地利用类型的生态系统服务供需量化矩阵使供给和需求具有统一可比的度量基础,从而为生态系统服务供需绝对平衡“量化测度→特征刻画→驱动剖析→模拟预测→优化调控”的系统性研究奠定方法论基础,但在实际过程中仍具有以下不确定性。

(1)生态系统服务供需量化矩阵实质上反映的是区域生态系统服务供给与需求的平均水平,因而存在区域内部差异体现不明显问题。然而,同一土地利用类型或生态系统类型在地域间具有不同的状态,从而生态系统服务供给程度不一,以及社会、经济、人口和政策环境存在差异而具有不同的生态系统服务需求。未来研究需要将生态系统服务供需量化矩阵更加细致化,如选取快速城镇化地区城郊区从镇域尺度开展生态系统服务供需平衡研究,或选取典型县域从网格尺度深入开展生态系统服务供需平衡研究。

(2)由于全类型的生态系统服务供需量化矩阵或当量因子法,在识别区域大气、水体、土壤等关键生态

环境要素问题上存在困难,致使部分生态环境要素好转情形未能得到充分凸显。未来应针对区域的关键生态环境要素问题,遴选主导的生态系统服务类型进行研究,以服务区域生态环境建设地方实践需要。

(3)基于区域本地生态系统服务供给与需求的假设前提,忽略供给与需求的空间流动。生态系统服务供给与需求均具有流动性,且其流动过程非常复杂,致使生态系统服务供给区边界与需求区边界在空间上往往不一致。然而,生态系统服务供需量化矩阵无法定量刻画生态系统服务供给与需求的流动过程、路径、数量等,使得生态系统服务供需平衡研究受到限制。

(4)将土地利用变化为生态系统服务供需平衡的主要驱动,事实上是一种对现实的极大简化,而现实中生态系统服务供需平衡演变受自然地理、社会经济和制度政策等多种因素的相互作用和共同约束。未来应结合自然地理、社会经济和制度政策等因素对生态系统服务供需量化矩阵进行修正,以提高其适用性和精确性;同时,还应加强基于组态视角下生态系统服务供

需平衡的多重驱动因素及其协同作用识别,以求更清晰、更精准地阐释生态系统服务供需平衡驱动机制。

4 结论

(1)2000—2018年,长江中游地区生态系统服务供需失衡是由建设用地大规模扩张和耕地、林地大面积缩减带来的生态系统服务供给能力减少和消费需求增加造成的。具体来看,武汉城市群、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等城市群较为集中的地区对生态系统服务的消费需求不断增加,加之生态系统服务的供给能力较为有限,进而加剧整个区域生态系统服务供需失衡。

(2)2000—2018年,长江中游地区不同类型生态系统服务供给、需求和供需平衡间的权衡与协同关系在时空尺度上存在显著差异。具体来看,长江中游地区不同类型生态系统服务供给的关系在时间尺度上由权衡转为协同,不同类型生态系统服务需求和供给平衡的协同关系在时间尺度上进一步增强,但不同类型生态系统服务供给、需求以及供需平衡的权衡或协同性质及其程度在空间尺度上却存在高度异质。

(3)2000—2018年,长江中游地区土地利用变化对生态系统服务供需平衡存在改善和恶化双重效应,且恶化效应显著大于改善效应,但引起生态系统服务及其分项服务供需改善和恶化的土地利用变化类型具有时序异质性。具体来看,2000—2010年,“耕地→林地”是致使生态系统服务总供需及其分项服务供需改善的主要原因;“林地→耕地”是导致生态系统服务总供需以及调节服务、文化服务供需恶化的主要原因,而“耕地→建设用地”是导致供给服务供需恶化的主要原因。2010—2018年,“建设用地→耕地”是致使生态系统服务总供需以及供给服务、文化服务供需改善的主要原因,而“耕地→林地”是致使调节服务供需改善的主要原因;“林地→建设用地”是导致生态系统服务总供需以及调节服务、文化服务供需恶化的主要原因,而“耕地→建设用地”是导致供给服务供需恶化的主要原因。

参考文献:

- [1] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报,2017,72(7):1277-1289.
MA L, LIU H, PENG J, et al. A review of ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7):1277-1289.
- [2] 申嘉澍,李双成,梁泽,等.生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J].自然资源学报,2021,36(8):1909-1922.
SHEN J S, LI S C, LIANG Z, et al. Research progress and prospect for the relationships between ecosystem services supplies and demands[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(8):1909-1922.

SHEN J S, LI S C, LIANG Z, et al. Research progress and prospect for the relationships between ecosystem services supplies and demands[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(8):1909-1922.

- [3] 刘晶晶,王静,戴建旺,等.黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J].自然资源学报,2021,36(1):148-161.
LIU J J, WANG J, DAI J W, et al. The relationship between supply and demand of ecosystem services and its spatio-temporal variation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1):148-161.
- [4] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J].地理学报,2021,76(11):2780-2796.
ZHAO X Y, MA P Y, LI W Q, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):2780-2796.
- [5] 杨宜男,李敬,王立,等.长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响[J].自然资源学报,2022,37(6):1555-1571.
YANG Y N, LI J, WANG L, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6):1555-1571.
- [6] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].地理学报,2019,74(9):1921-1937.
LIU L C, LIU C F, WANG C, et al. Supply and demand matching of ecosystem services in loess hilly region: A case study of Lanzhou [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9):1921-1937.
- [7] CHEN W X, CHI G Q, LI J F. The spatial aspect of ecosystem services balance and its determinants[J]. *Land Use Policy*, 2020, 90:e104263.
- [8] ZHANG Y L, ZHAO Z Y, FU B J, et al. Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: A case study in the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315:e115158.
- [9] ZHAI T L, WANG J, JIN Z F, et al. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:e106068.
- [10] 刘春芳,王韦婷,刘立程,等.西北地区县域生态系统服务的供需匹配:以甘肃古浪县为例[J].自然资源学报,2020,35(9):2177-2190.
LIU C F, WANG W T, LIU L C, et al. Supply-demand matching of county ecosystem services in Northwest

- China: A case study of Gulang county[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2177-2190.
- [11] GUAN Q C, HAO J M, REN G P, et al. Ecological indexes for the analysis of the spatial-temporal characteristics of ecosystem service supply and demand: A case study of the major grain-producing regions in Quzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: e105748.
- [12] LI J Y, GENELETTI D, WANG H C. Understanding supply-demand mismatches in ecosystem services and interactive effects of drivers to support spatial planning in Tianjin metropolis, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 895: e165067.
- [13] SUN Y, ZHAO T Y, COTELLA G, et al. Ecosystem services supply and demand mismatches and effect mechanisms in the mixed landscapes context[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: e163909.
- [14] JIANG M, JIANG C, HUANG W M, et al. Quantifying the supply-demand balance of ecosystem services and identifying its spatial determinants: A case study of ecosystem restoration hotspot in Southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 174: e106727.
- [15] WEI H J, FAN W G, WANG X C, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [16] WEI H J, LIU H M, XU Z H, et al. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 44-57.
- [17] ZHANG X R, WANG Y S, YUAN X F, et al. Identifying ecosystem service supply-demand imbalance for sustainable land management in China's Loess Plateau [J]. *Land Use Policy*, 2022, 123: e106423.
- [18] 陈立恒, 龚健, 王雄, 等. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5546-5556.
- CHEN L H, GONG J, WANG X, et al. Spatial relationship between ecosystem services balance and urbanization in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5546-5556.
- [19] 刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究: 以嘉兴市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(4): 1189-1202.
- LIU S, YANG Y, WANG Y C. Mapping supply and demand differentiation of hydrological regulation service based on matrix analysis: A case study of Jiaxing City, Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1189-1202.
- [20] 欧维新, 王宏宁, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6337-6347.
- OU W X, WANG H N, TAO Y. A land cover-based assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [21] 苑韶峰, 唐奕钰, 申屠楚宁. 土地利用转型时空演变及其生态环境效应: 基于长江经济带 127 个地级市的实证研究[J]. *经济地理*, 2019, 39(9): 174-181.
- YUAN S F, TANG Y Y, SHENTU C N. Spatiotemporal change of land-use transformation and its eco-environmental response: A case of 127 counties in Yangtze River economic belt[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(9): 174-181.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2019.
- National Statistics Bureau of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Publishing house, 2001—2019.
- [23] 湖北统计局. 湖北统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2019.
- Statistics Bureau of Hubei Province. Hubei statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Publishing house, 2001—2019.
- [24] 湖南统计局. 湖南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2019.
- Statistics Bureau of Hunan Province. Hunan statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Publishing house, 2001—2019.
- [25] 江西统计局. 江西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2019.
- Statistics Bureau of Jiangxi Province. Jiangxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Publishing house, 2001—2019.