基于碳中和的滇中城市群生态系统碳固持服务供需评价及优化策略研究

Evaluation of the Supply and Demand of Ecosystem Carbon Sequestration Services in the Central Yunnan Urban Agglomeration Based on Carbon Neutrality and Optimization Strategies

董俊梅[1] 潘 悦[2] 张瀚琪[1] 陈文漪[1] 刘 敏[1*]
DONG Junmei[1] PAN Yue[2] ZHANG Hanqi[1] CHEN Wenyi[1] LIU Min[1*]

（1.昆明理工大学建筑与城市规划学院，昆明 650224；2.西南林业大学园林园艺学院，昆明 650224）
（1. School of Architecture and Urban Planning, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China, 650550; 2. College of Landscape Architecture and Horticulture Sciences, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan, China, 650550）

文章编号：1000-0283(2025)01-0083-10
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 01. 0083. 009
中图分类号：TU986
文献标志码：A
收稿日期：2024-08-13
修回日期：2024-10-14

摘 要

滇中城市群生态系统健康可持续发展对于中国西部生态安全建设具有重要意义，为响应城市固碳增汇目标及其城市群高质量发展目标，尝试从区域固碳供需的角度，提出契合区域发展特性的优化策略，为促进生态文明的可持续发展提供科学支撑。采用InVEST模型、ArcGIS空间分析工具，对2020年的碳固持服务的供给和需求的供需比值、空间变化特征进行分析，并基于供需比值差异划分不同的碳固持服务发展主体功能区。结果表明：滇中城市群碳固持服务供给大于需求，碳固持优势明显，碳固持需求量整体偏低且呈现中部高四周低的状态，区县发展差异较大。滇中城市群可持续发展规划需加强西北部碳固持服务主体保育工作，协调东南部生态资源与城市发展之间的供需平衡，优化中部固碳服务重点建设区并建立战略合作机制，优化城市基础功能建设，提出“一核两心双翼”的一体化发展格局，以带动周边城市绿色高质量发展。

关键词

碳中和；碳固持服务；供需评价；优化策略；滇中城市群

Abstract

Establishing ecological security in western China greatly depends on the environment of the city cluster in central Yunnan, which is developing healthily and sustainably. To support the sustainable development of the ecological civilization, an optimization strategy that fits the features of regional development from the perspective of regional carbon sequestration supply and demand is proposed. This is in response to the city's carbon sequestration and sink enhancement goals, as well as the high-quality development of the city cluster. To analyze the supply-demand ratio and the spatial characteristics of the supply and demand of carbon sequestration services in 2020, this paper uses the InVEST model and ArcGIS spatial analysis tools. It then uses these data to categorize various main functional zones for developing carbon sequestration services according to differences in the supply-demand ratio. The findings indicate clear benefits to carbon sequestration in the Central Yunnan Urban Agglomeration, where there is a surplus of available services. The demand for carbon sequestration is generally low, with a high concentration in the city and a low concentration in the surrounding areas, and there are significant regional and county-level development disparities. The Central Yunnan Urban Agglomeration's sustainable development plan needs to prioritize the preservation of carbon sequestration services in the northwest of the nation, balance the supply and demand for ecological resources and urban development in the southeast, establish a strategic cooperation mechanism in the nation's center to maximize carbon sequestration services in key construction zones, maximize the construction of urban infrastructure, and propose the "one core, two centers, and two wings" integrated development pattern to promote the environmentally conscious and high-quality development of the surrounding cities.

Keywords

carbon neutralization; carbon sequestration service; supply and demand evaluation; optimization strategy; Central Yunnan Urban Agglomeration

董俊梅
1996年生／女／云南保山人／在读硕士研究生／研究方向为大地景观规划与生态修复

潘 悦
2000年生／女／云南昭通人／在读博士研究生／研究方向为大地景观规划与生态修复

刘 敏
1987年生／女／湖南娄底人／博士／副教授／研究方向为绿色基础设施理论、绿色空间优化、生态规划设计、生态修复

*通信作者（Author for correspondence）
E-mail: minliu_facp@kust.edu.cn

基金项目：
国家自然科学基金项目“生态系统服务供需视角下滇中高原湖泊城市群关键绿色基础设施识别与优化”（编号：52268014）；云南省自然科学基金项目“基于生态系统服务的滇中国土空间自然保护地体系优化”（编号：202401AT070357）

碳固持指自然植被同化和固碳的过程[1]。碳储量是衡量碳汇能力的一个关键指标，其反映了生态系统在过去和当前通过碳固持活动累积的碳量，陆地生态系统中的碳储量越高，其碳汇能力越强，对气候变化的缓解作用也越大[2-4]。碳固持服务需求则对应社会经济活动的碳排放量[5]。在中国“双碳”目标背景下，从主体功能区的角度，准确估算生态系统碳储量，进行供需评价研究，对于科学指导县域层面碳平衡发展需求差异化、优化减碳增汇政策的科学性和指向性，进而实现区域绿色高质量发展具有重要意义[6-7]。

近年来，碳固持服务研究备受国内外学者的关注。早期大多学者主要集中于生态系统固碳服务供给侧量化评估研究[8]，仅从供给侧测算生态系统固碳服务潜力及现状无法明确生态系统与社会发展间的关系。近期，从供需平衡角度开展碳固持服务研究成为主流趋向[9-10]。生态系统碳固持服务的研究方法主要有实地调查采样法、遥感测算、模型模拟等[11]。实地调查采样法数据精确但不适用于大尺度研究范围[12-13]。遥感测算方法虽有宏观监测的优势，但仅在特定区域或地类下适用[14]。而模型模拟的方法由于研究尺度灵活、数据获取容易、便于操作等特点而被学者广泛运用，如今测算模型也趋于多样化，大量学者主要以InVEST模型碳固持模块[15]、NPP表征[16]、光合作用方程式[17]等方法量化碳固持服务的供给量。其中InVEST模型中的碳固持模块，常被用于多种空间尺度研究[18]。碳固持服务的需求量主要以地区碳排放量为保守估计值，结合人口密度等数据来估算[16]。供需关系方面，有学者使用基于LUCC的供需矩阵量化方法[19]、空间制图法[20]、碳氧平衡分析模型[21]及碳收支平衡[22]、供需比等方法进行评价分析。目前，碳固持研究数据多来源于前人研究或实地考察[23]，而碳固持量核算的精度是“双碳”目标实现的重要基础与前提[24]。研究尺度跨城市群[6,25]、区域[16]及省市[26]，而城市群作为城市发展的新形式，也是区域生态保护修复的热点区域[27]。碳固持服务研究多集中于经济发达的中国中部和东部城市群，如京津冀[28]、珠三角[29]、长三角[30-31]等，中国西部地区却鲜有关注，尤其滇中城市群[32]作为全省经济与自然资源的宝库，而城市群内部发展不均衡，未能充分发挥其潜在的最大效能。

滇中城市群位于“一带一路”和长江经济带的交汇区域，是全国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分，也是面向南亚东南亚辐射的核心区域。虽然保持着较好的生态环境，但其经济发展水平尚未充分实现潜力。目前，滇中城市群正面临城镇空间扩张带来的生态环境压力，并且区域特色不明显[33]。依托滇中生态优势，合理规划减少碳固持服务低值区，提高生态系统固碳服务能力，是实现云南省“碳中和”目标的关键。为此，本研究基于第三次全国土地调查数据，对2020年滇中城市群的碳固持服务供需状况进行深入分析，识别区域内部在碳固持服务供给与需求比值上的空间差异，并据此提出优化策略，利用滇中城市群丰富的自然资源优势，为该区域的可持续发展提供坚实支撑，并助力其成为云南省高质量发展的核心动力。

1 研究区概况

滇中城市群属湖盆岩溶高原地貌，地形以山地和山间盆地为主，形成“山坝相间，河谷深切，六湖三水两山”的自然地理格局，是典型的高原湖泊山地城市。气候温和湿润，降水多，属低纬度高原山地季风气候。按照2020年发布的《滇中城市群规划》，滇中城市群具体包括昆明市、曲靖市、玉溪市和楚雄彝族自治州（简称楚雄州）及红河哈尼族彝族自治州（简称红河州）北部的蒙自市、个旧市、建水县、开远市、弥勒市、泸西县、石屏县7个县市，由49个县、市、区组成。滇中城市群是云南省人口最集中、经济最活跃、功能最完善的区域，根据2022年的统计，全省28.27%的国土面积，约11.14×10^4 km^2。集聚了全省46.98%的常住人口和62.02%的地区生产总值。滇中城市群是国家重点培育的城市群之一和西部大开发的重点地带，2020年《滇中城市群发展规划》获国家发改委批复上升为国家战略。在云南省“十四五”规划和2035年远景目标中，滇中五州市是推动区域协调发展的关键布局。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

文章中的基础数据包括：（1）土地利用数据：2020年土地利用数据来源于三调数据，根据《土地利用现状分类》（GB/T 21010-2017），按照研究需要将土地利用数据划分为耕地、乔木林地、灌木林地、竹林地、其他林地、草地、园地、水域、建设用地及未利用地，栅格为100 m。（2）人口密度：通过总人口/区域面积获取，总人口数据来源于《云南省统计年鉴》。（3）碳库表：由于云南省相关碳库表研究较少，本研究参考邹文涛、刘冠等学者的相关研究[34-35]。（4）碳排放数据：来源于《中国碳核算数据库》（https://www.ceads.net.cn/），该数据由国家物理地球数据中心（NGDC）提供的DMSP/OLS和NPP/VIIRS夜间灯光数据反演得出，数据具有统计口径一致、连续性强等优势[36]。由于《中国碳核算数据库》中滇中城市群区县尺度的碳排放数据不完整，选择相近年份（2019年）云南省碳排

放数据作为基础数据。

2.2 研究方法

2.2.1 碳固持供给

文章采用InVEST的碳固持模块（carbon storage and sequestration）计算研究区的碳固持供给量。碳固持服务供给量是生态系统固有特性的直接反映，通过解析土地利用图和对各类型生态系统中碳库的碳储量进行定量汇总，以此作为碳固持服务供给的量度，反映该区域生态系统对碳的吸收和储存能力[37]。为确保模型测算的精度，参数校准以贵州省为参照，鉴于其与云南同处云贵高原，具有相似的生态特征，因此可以确保模型参数的区域适应性。InVEST模型中的碳固持模块将陆地生态系统中碳储分为四大基本碳库，即储存在地上生物量中的碳量、储存在地下生物量中的碳量、储存在土壤中的碳量以及储存在死亡有机物中的碳量之和[38]。计算见公式（1）（2）。

$$C_{TX}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \quad (1)$$

$$C_{total}=C_{TX}\times S_{coumt} \quad (2)$$

式中，C_{TX}为栅格X的总碳固持量；C_{above}为储存在地上生物量中的碳密度；C_{below}为储存在地下生物量中的碳密度；C_{soil}为储存在土壤中的碳密度；C_{dead}为储存在死亡有机物中的碳密度；C_{total}为区域内每种土地利用总的碳储存量；S_{count}为每一土地利用类型对应的栅格数。

2.2.2 碳固持需求

根据前人的研究[39]，以人均碳排放量和人口密度的乘积作为碳固持服务总的需求量。计算见公式（3）。

$$C_{DE}=\frac{C_{em}}{Y_{yn}}\times P_d \quad (3)$$

式中，C_{DE}为碳固持服务总需求量；C_{em}为云南省2019年的碳排放量；Y_{yn}为云南省的总人口；P_d为滇中城市群各区县的人口密度。

2.2.3 碳固持供需比

由于碳固持和碳排放之间的数量关系复杂，所以通过计算碳固持与碳排放的比率来描述区域简要的碳平衡关系，从而能够清楚地表达碳固持供给和需求之间的定量关系，更好地反映碳固持供给与需求之间的差异[40]。需求量为人均碳排放量和人口密度的乘积，为更好地反映出供需关系，本研究采用地均碳固持供给量[6]与地均碳固持需求量来进行计算，见公式（4）。

$$R_i=\frac{C_{DE}}{C_{total}/A_i} \quad (4)$$

式中，R_i为供需比；C_{DE}为碳固持服务需求量；C_{total}为碳固持服务供给量；A_i为滇中城市群各区县的区域面积。R_i表示区域碳固存服务的供给与需求关系，其值越小，说明该区域的碳固持供给量越高，反之，则越低。当R_i值小于1时，表明区域碳固持供给大于需求；相反，当R_i大于1时，表明区域碳固持服务需求大于供给[41]。

3 碳固持服务供需分析

3.1 固碳服务供给

从不同土地利用类型看（表1），碳固持服务供给量最大的为乔木林地，其供给量为1 573.38×10^6 t，占比最大，为66.92%；其次为耕地与灌木林地的碳固持服务供给量，其供给量分别为364.45×10^6 t、193.15×10^6 t，占比分别为15.50%、8.21%；再为竹林地和未利用地，其供给量分别为6.48×10^6 t、3.63×10^6 t，占比分别为0.28%、0.15%。

据图1可知，滇中城市群的碳固持服务供给在不同土地利用类型和区域间表现出明显的差异性。乔木林地和灌木林地的高值区主要集中在边缘城市，而中值区则在西部、东部及中部地区零散分布。相比之下，中低值区及低值区在中部、南部、东部及北部更为普遍。竹林地的碳固持供给在南部较高，而北部和中部相对较低。园地和耕地的碳固持供给同样呈现中间低、四周高的格局。草地的碳固持供给在北部和南部较高，中部较低。建设用地和未利用地的碳固持供给则在

表1 不同土地利用类型碳固持供给量表
Tab. 1 Carbon sequestration supply by land use type

土地利用类型 Land use type	碳固持量 /10^6 t Carbon sequestration	占比 /% Percentage
水体	0.00	0.00
未利用地	3.63	0.15
建设用地	44.82	1.91
园地	43.19	1.84
耕地	364.45	15.50
草地	86.47	3.68
竹林地	6.48	0.28
其他林地	35.44	1.51
灌木林地	193.15	8.21
乔木林地	1 573.38	66.92
总计	2 351.01	100.00

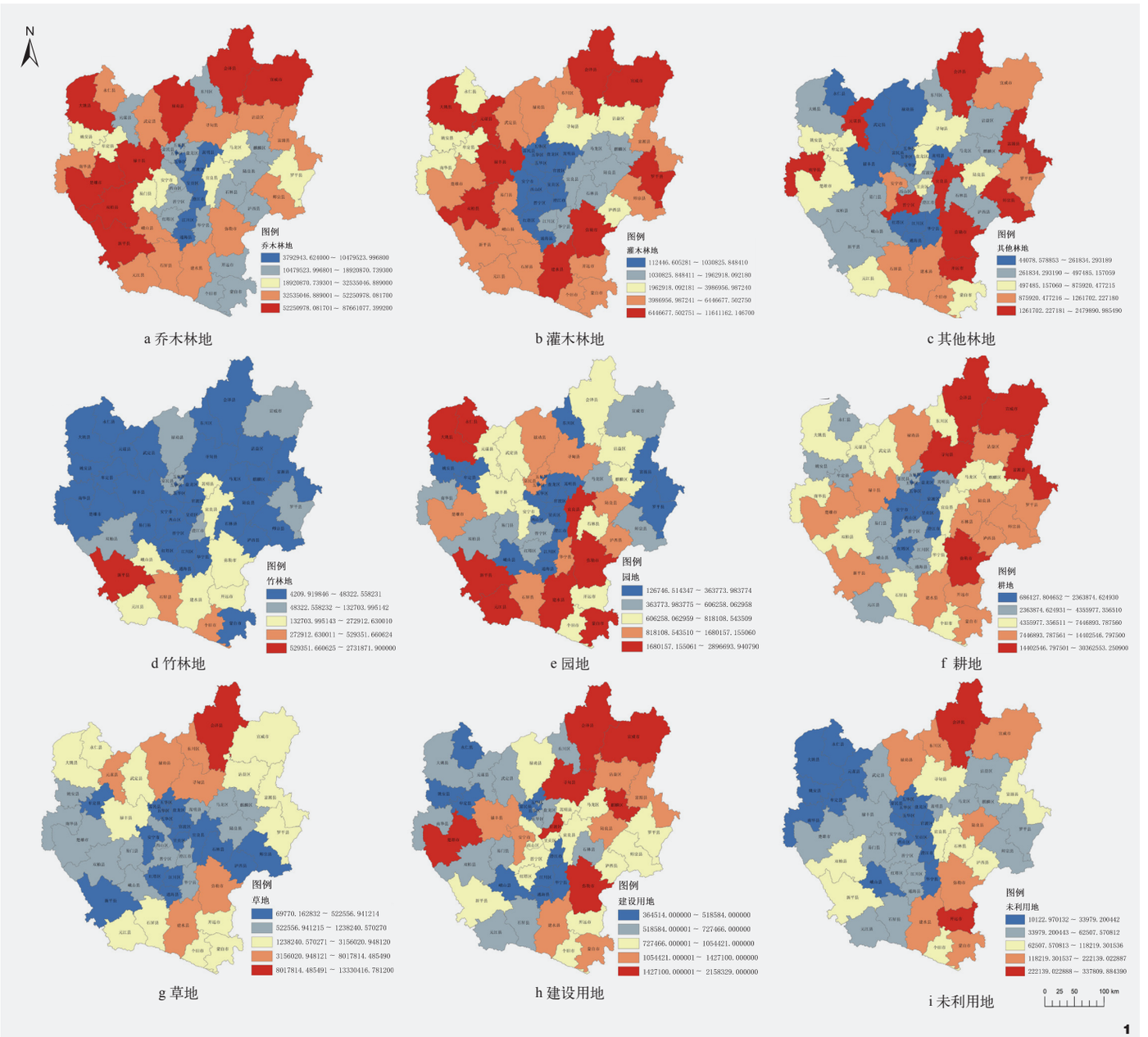


图1 不同土地利用类型区县尺度碳固持供给空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of carbon sequestration supply at district and county scales for different land use types

东部高于西部，反映出区域发展水平和土地利用模式的空间差异。

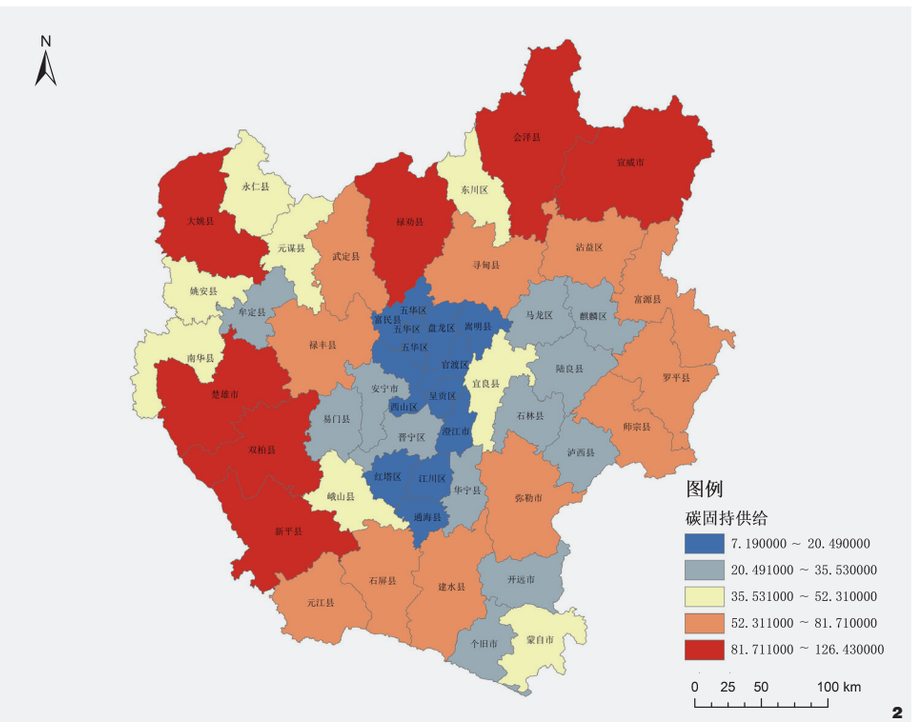
为揭示滇中城市群碳固持供给量的空间差异，研究将供给量在区县尺度上进行分区统计，并采用自然间断点分级法将其分为5类。根据图2和表2的数据，滇中城市群的碳固持服务总供给量达到了2 351.01×10^6 t，呈现出中心城市低于边缘城市的空间分布，形成四周高、中心低的格局。具体来看，曲靖市的碳固持供给量位居首位，曲靖市和楚雄州的碳固持供给量占整个城市群供给量的50%以上。红河州、昆明市和玉溪市的碳固持供

给量相对接近。滇中城市群的西北部是碳固持供给的核心区域。在区县尺度上，碳固持供给的高值区和中高值区主要集中在滇中城市群的边缘城市，其占比分别为4.05%及以上、2.39% ~ 3.47%。中值区的分布较为分散，主要位于滇中城市群的西北部、中部以及南部的部分地区，其占比区间为1.58% ~ 2.23%。中低值区则主要分布在滇中城市群的东部、中部和南部，其占比区间为0.98% ~ 1.51%。而低值区则较为集中，主要位于滇中城市群的中部区域，其占比区间为0.30% ~ 0.87%。

3.2 碳固持服务需求

根据表3的数据，滇中城市群的碳固持总需求量为67 613.71 t/km²。其中昆明市的需求量为43 020.12 t/km²，占总需求量的63.63%，位居首位。曲靖市和玉溪市分别占总需求量的12.03%和11.74%，需求量分别为8 136.23 t/km²和7 936.87 t/km²，红河州的需求量为5 164.68 t/km²，占总需求的7.64%，楚雄州的需求量最低，为3 355.81 t/km²，占比4.96%。昆明市的五华区和官渡区的碳固持需求量最高。曲靖市中麒麟区的需求量最为突出。曲靖市麒麟区、玉溪市红塔区、红河州蒙自市和个旧市需求量也相对较高，相比之下，楚雄州的需求量普遍较低，仅楚雄市的需求量相对较高。数据揭示了滇中城市群多为单核发展模式，以及在州市尺度内，各个区县之间发展程度有显著差异。

由图3可知，滇中城市群的碳固持需求量整体偏低且呈现中部高四周低的状态。其高值区及中高值区主要分布于滇中城市群的中部主要城市，包括盘龙区、五华区、官渡区及西山区；其中值区分布较散且数量极少，主要是麒麟区、嵩明县及红塔区；其中低值区及中值区分布极为广泛，遍布滇中各个方



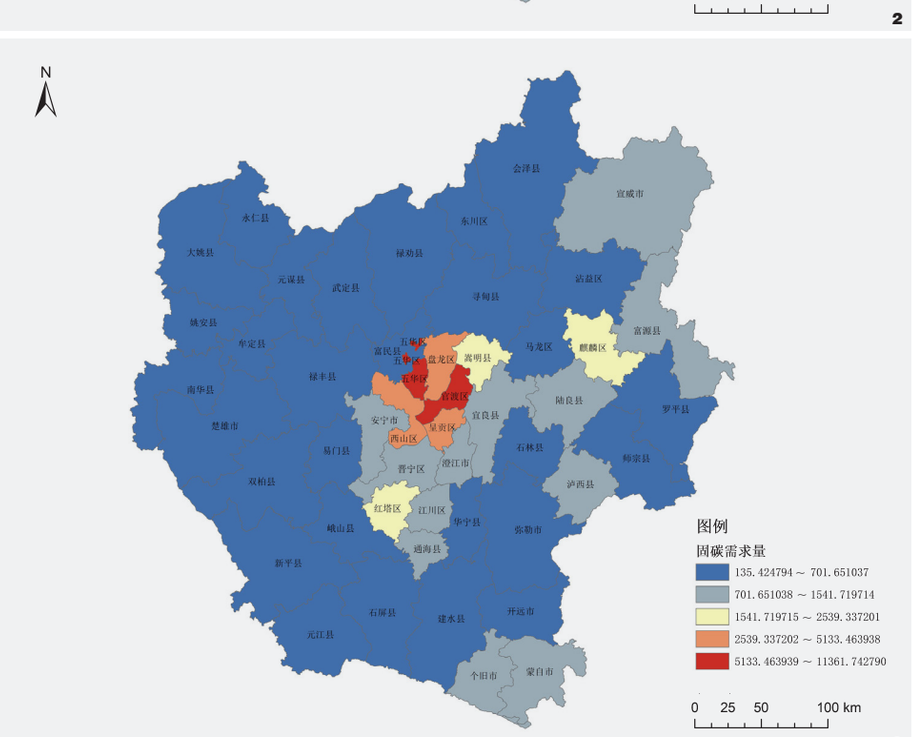


图2 滇中城市群碳固持供给空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution of carbon sequestration supply in Central Yunnan Urban Agglomeration

图3 滇中城市群碳固持需求空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of carbon sequestration demand in Central Yunnan Urban Agglomeration

表2 滇中城市群碳固持供给量表

Tab. 2 Carbon sequestration supply in Central Yunnan Urban Agglomeration

州市名称 City	区县名称 County	碳固持供给 /10^6t Carbon sequestration supply	占比 /% Percentage	州市名称 City	区县名称 County	碳固持供给 /10^6t Carbon sequestration supply	占比 /% Percentage
昆明市	五华区	7.82	0.33	玉溪市	澄江市	12.37	0.53
	盘龙区	18.47	0.79		华宁县	23.08	0.98
	官渡区	9.90	0.42		通海县	14.85	0.63
	西山区	16.66	0.71		易门县	33.76	1.44
	呈贡区	7.19	0.30		峨山县	45.70	1.94
	晋宁区	26.26	1.12		新平县	100.82	4.29
	东川区	37.10	1.58		元江县	61.28	2.60
	安宁市	28.44	1.21	楚雄州	楚雄市	106.30	4.52
	嵩明县	15.30	0.65		双柏县	95.60	4.07
	富民县	20.06	0.85		禄丰县	81.71	3.47
	石林县	32.03	1.36		武定县	68.06	2.89
	宜良县	37.57	1.60		元谋县	39.15	1.67
	寻甸县	73.58	3.13		永仁县	49.75	2.12
	禄劝县	95.24	4.05		大姚县	96.53	4.11
曲靖市	麒麟区	28.80	1.23		姚安县	40.77	1.73
	沾益区	56.10	2.39		牟定县	33.56	1.43
	马龙区	32.42	1.38		南华县	52.31	2.23
	宣威市	126.43	5.38	红河州	蒙自市	38.55	1.64
	会泽县	122.43	5.21		个旧市	29.70	1.26
	陆良县	35.53	1.51		开远市	34.33	1.46
	富源县	64.96	2.76		弥勒市	74.10	3.15
	罗平县	59.03	2.51		泸西县	28.54	1.21
	师宗县	58.43	2.49		建水县	76.75	3.26
玉溪市	红塔区	20.49	0.87		石屏县	69.33	2.95
	江川区	13.87	0.59		总计	2 351.01	100

位的区域。

3.3 碳固持服务供需特征

由图4可看出，滇中城市群碳固持服务供需比值总体均小于1，说明滇中城市群碳固持服务供给大于需求，且整体呈现滇中城市群中部比值大于四周比值，西部比值小于东部比值的趋势。虽然滇中城市群碳固持服务总体均供给大于需求，但在滇中城市群中，盘龙区、五华区、官渡区等核心发展区域是高比值的核心区域，也是碳固持服务需求的主要城市，而双柏县、新平县、元江县等边缘区县是低比值的核心区域，为碳固持服务供给的主要城市。

4 分区优化策略

滇中城市群有丰富的植被和较高的海拔，生态固碳潜力超过其碳排放量，但资源开发利用率较低，绿色高质量发展水平不足，呈现“西北部高、东南部中等、中部最低”的空间特征。碳固持服务的需求量集中分布于昆明市、曲靖市和玉溪市等中心城市，表明滇中城市群“单核心”发展模式严重，核心昆明市的带动能力、辐射能力都需提升。各区县的碳供给源的空间分布和土地利用类型表现出明显差异。滇中城市群虽聚集全省2/3的坝区资源，但县市间的协同发展不足，各类资源呈现“大分散小聚集”的特点。因此，改善中部地区的生态空间布局和提高资源利用效率是当务之急。提升森林覆盖率和固碳能力是滇中城市群发展的重点，发挥生态文明建设后发优势，以促进绿色经济转型。基于碳固持服务供需状况和区域生态系统的固碳能力，结合《滇中城市群发展评估研究报告》等相关资料[42-43]，从区域协调发展视角，将滇中城市群划分为4大分区类型（表4，图5），并提出以下优化建议：

（1）固碳优化区：固碳优化区位于滇中城市群的核心地带，包括昆明市的官渡区、五华区、呈贡区、西山区、盘龙区、嵩明县，玉溪市的红塔区，以及曲靖市的麒麟区等8个区县。随着城镇化进程的加速，该区域的生态空间遭受挤压，建设用地成为主要的固碳空间，自然生态空间的碳汇功能相对较弱，空间冲突明显。因此，建议对建设用地开发实施严格管控，以提高土地利用效率；加强对国家森林公园、国家公园等自然保护地的保护与修复工作，以增强其生态服务功能，提出监测和评估机制，确保策略实施的有效性和持续性；通过实施城市“双修”和城市更新治理策略，解决“城市病”问题，重点推进垂直绿化、屋顶绿化等立体绿化措施，以优化城市功能并提升人居环境品质；依托昆明都市圈的政策优势和优质的生活环境，吸引高端人才和创新企业，增强都市圈的创新能力与竞争力；优化区域核心的辐射

表3 滇中城市群碳固持需求量表
Tab. 3 Carbon sequestration demand in Central Yunnan Urban Agglomeration

州市名称 City	区县名称 County	固碳需求量 /（t/km²） Carbon sequestration demand	占比 /% Percentage	州市名称 City	区县名称 County	固碳需求量 /（t/km²） Carbon sequestration demand	占比 /% Percentage
昆明市	五华区	11 361.74	16.80	玉溪市	澄江市	903.40	1.34
	盘龙区	4 600.00	6.80		华宁县	600.95	0.89
	官渡区	9 910.90	14.66		通海县	1 541.72	2.28
	西山区	4 215.53	6.23		易门县	390.72	0.58
	呈贡区	5 133.46	7.59		峨山县	293.01	0.43
	晋宁区	1 019.51	1.51		新平县	242.27	0.36
	东川区	551.41	0.82		元江县	283.36	0.42
	安宁市	1 465.25	2.17	楚雄州	楚雄市	559.88	0.83
	嵩明县	1 956.51	2.89		双柏县	135.42	0.20
	富民县	591.90	0.88		禄丰县	407.49	0.60
	石林县	564.36	0.83		武定县	319.87	0.47
	宜良县	792.34	1.17		元谋县	390.81	0.58
	寻甸县	504.46	0.75		永仁县	180.03	0.27
	禄劝县	352.75	0.52		大姚县	222.90	0.33
曲靖市	麒麟区	2 539.34	3.76		姚安县	380.15	0.56
	沾益区	567.96	0.84		牟定县	405.58	0.60
	马龙区	477.46	0.71		南华县	353.68	0.52
	宣威市	774.85	1.15	红河州	蒙自市	1 069.17	1.58
	会泽县	532.17	0.79		个旧市	1 056.94	1.56
	陆良县	1 185.35	1.75		开远市	657.37	0.97
	富源县	820.58	1.21		弥勒市	541.72	0.80
	罗平县	701.65	1.04		泸西县	931.11	1.38
	师宗县	536.87	0.79		建水县	557.04	0.82
玉溪市	红塔区	2 448.02	3.62		石屏县	351.33	0.52
	江川区	1 233.42	1.82		总计	67 613.71	100.00

表4 滇中城市群固碳服务供需优化分区特征
Tab. 4 Characteristics of the optimized zoning of supply and demand of carbon sequestration services in Central Yunnan Urban Agglomeration

供需比 Demand-supply ratio	分区 Zoning	区域特征 Regional characteristics
0.356340 ~ 0.637277	固碳优化区	城镇化迅速，生态空间压缩，建设用地为主要固碳空间
0.136218 ~ 0.356339		
0.076899 ~ 0.136217		
0.040933 ~ 0.076898	碳汇发展区	经济状况良好，碳供给能力相对较弱，供需基本平衡
0.025550 ~ 0.040932	协调发展区	生态环境优越，碳供给能力强，经济和人口密度较低
0.013833 ~ 0.025549	低碳保持区	生态环境优良，固碳能力强，供需状况盈余
0.005517 ~ 0.013832		

能力，带动周边地区发展，形成“一核（昆明）两翼（昆玉、昆楚一体化）”的格局，合理调控人口密度，强化交通链接与城市间的分工合作。

（2）碳汇发展区：包括昆明市的安宁市、晋宁区，玉溪市的通海区、江川区、澄江市，曲靖市的陆良县，以及红河州的蒙自市、个旧市、泸西县共9个区县。此区域经济发展较好，但碳供给能力相对较弱，生态服务需求低于固碳优化区，供需关系基本平衡。建议依托地理优势，提升澄江市与蒙自市的次核心地位，增强其经济和人口吸引力，陆良县紧密联系麒麟区，共同形成核心都市圈与固碳优化区协同发展，重点应转向生态经济，包括发展生态农业、推广特色旅游和合理规划未利用地等策略，以扩展绿色空间。大力发展生态经济，推动产业向低碳方向转型，科学配置资源，确保生态保护与国土开发并行。

（3）协调发展区：包括昆明市的宜良县、石林县、富民县、东川区，曲靖市的富源县、宣威市、罗平县、沾益区，红河州的开远市、弥勒市和建水县，以及玉溪市的华宁县共12个区县。这些地区生态环境良好，碳供给能力强，处于轻度盈余状态，但由于经济发展滞后与人口密度较低，导致需求不足，形成供需失衡，建议加强基础设施建设，提升区域互联通性，适度开发旅游业，优化产业结构，推动绿色经济发展。通过引导人口向城镇区域流动、吸引人才以及提升区域教育资源水平，实现经济、社会与生态的协调发展。

（4）低碳保持区：该区域包括楚雄州，曲靖市的会泽县、师宗县和马龙区，昆明市的寻甸县和禄劝县，红河州的石屏县，以及玉溪市的易门县、元江县、峨山县和新平县

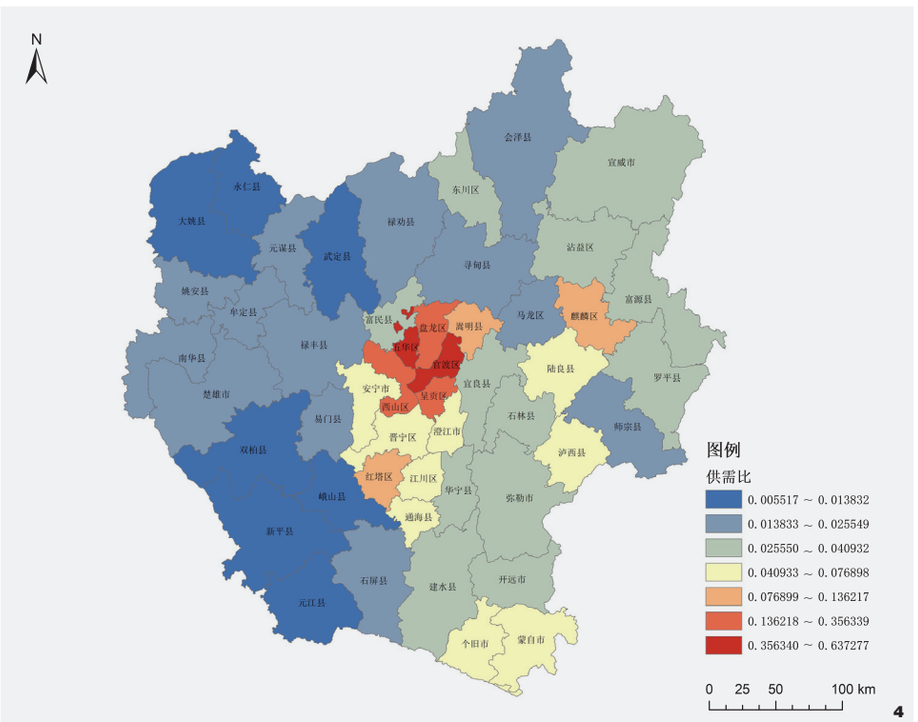


图4 滇中城市群碳固持服务的供需比空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of the demand-supply ratio of carbon sequestration services in Central Yunnan Urban Agglomeration

图5 滇中城市群固碳服务供需优化分区图
Fig. 5 Optimization of the supply and demand of carbon sequestration services in Central Yunnan Urban Agglomeration by region

共20个区县。该区生态环境优良，碳汇能力显著，供需呈现中到高度盈余。建议继续巩固生态优势，警惕城市化进程中生态退化的风险，通过科学规划生态用地，严守生态红线，禁止在生态敏感区开发。促进生态旅游和地方特色产业的发展，推动环境友好型产业的落地。调整城市生产、生活和基础设施空间，确保土地资源的合理利用，防止无序开发造成的国土资源浪费。

5结论与讨论

本文通过滇中城市群的案例研究，探讨城市群碳固定服务的供需平衡，并得出以下结论：

（1）碳固持服务供给空间分布：滇中城市群的碳固持总供给量为2 351.01×10^6 t，呈现出“四周高、中心低”的空间格局。曲靖市和楚雄州的供给量最高，占总供给量的一半以上。在区县尺度上，滇中城市群西北部是碳固持供给的核心区域。乔木林地和灌木林地是主要的碳固持供给源，而建设用地则是碳固持需求的主要区域。

（2）碳固持需求空间分布：滇中城市群的碳固持总需求量为67 613.71 t/km^2，整体偏低，呈现出“中部高、四周低”的分布格局。昆明市和曲靖市需求量最高，楚雄州最低。区县层面，需求高值区集中在昆明市的核心区，揭示出单核发展模式下的经济和人口发展水平差异。

（3）供需比分析：滇中城市群整体供需比均小于1，表明碳供给充足而需求较低，反映了该城市群在固碳能力上的优势及经济发展的不足。供需比高值区集中在中部，边缘城市的碳固持能力高于中心城市，进一步验证城市群单核发展模式导致人口极化的形成，发展核心区域“人—地”矛盾较重，城

市一体化发展受阻隔，形成“大分散”的发展格局。

（4）区域功能分区与优化策略：根据碳固持供需比，将滇中城市群划分为固碳优化区、碳汇发展区、协调发展区和低碳保持区4大功能区。基于此，提出相应的低碳策略与管控建议：固碳优化区，重点提升昆明市等核心区域的辐射能力，优化人口密度和交通连接，推动区域协同发展；碳汇发展区强化次级增长中心，推动产业低碳转型；协调发展区需提升基础设施互联互通，并发展生态旅游；低碳保持区应重点保护碳汇资源，提升碳存储潜力，并借助生态旅游促进可持续经济增长。

相较于其他研究，本文专注于滇中城市群碳固持服务的空间差异特征，并根据区域生态和经济状况提出了相应的优化策略。相较于经济发达或人口密集的城市群，滇中城市群由于其独特的地形和丰富的自然资源，具有显著的碳固持潜力，同时也面临着城市化带来的生态压力，该城市群的单核发展模式及其与周边地区的不平衡发展，为本研究提供了一个独特的研究视角。

本研究采用基于人口密度和人均排放量的碳需求计算方法，研究方法为初步估算提供便利，但可能未能充分捕捉到碳需求的复杂性和多样性。因此，未来研究可引入能源结构等测算方法进行校核，以求进行更为精确的碳需求评估[9]。此外，水体固碳作为生态系统的重要组成部分未被纳入本次研究[44-45]，未来可通过增加数据收集来完善碳固持评估。本研究以城市群和区县为尺度，对生态系统碳固持服务的空间供需差异进行了评估。碳固持服务供给量是衡量生态系统碳汇能力的一个重要指标，未来的研究可以依赖于更为精细的模型和持续的监测体系[46-48]，以实现对生态系统碳汇能力变化规律更精确且深入的解析。

总之，滇中城市群的碳固持服务研究具有重要的理论与实践意义，未来研究可进一步细化至城市内部，并探索动态碳平衡与区域联动机制，以期为城市群的绿色发展提供更为精准的政策支持。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 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.

[2] SUN B, DU J, CHONG F, et al. Spatio-Temporal Variation and Prediction of Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems in the Yellow River Basin[J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3866.

[3] 王耕, 俞乔山. 大连金普新区碳固持生态服务供需格局时空差异[J]. 生态学报, 2023(12): 4847-4857.

[4] 武艳芳, 易扬, 张桂莲, 等. 城市绿地碳核算方法及增汇减排技术研究进展[J]. 园林, 2024(7): 74-80.

[5] TAO Y, WANG H, OU W, et al. A Land-cover-based Approach to Assessing Ecosystem Services Supply and Demand Dynamics in the Rapidly Urbanizing Yangtze River Delta Region[J]. Land Use Policy, 2018, 72: 250-258.

[6] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 等. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3354-3367.

[7] ZHANG Z, WANG S, ZHANG J. Spatiotemporal Evolution of Carbon Budget and Carbon Compensation Zoning of Urban Agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 17984.

[8] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008(2): 463-469.

[9] 孟士婷, 黄庆旭, 何春阳, 等. 区域碳固持服务供需关系动态分析: 以北京为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1191-1203.

[10] 李潇, 吴克宁, 冯喆, 等. 基于固碳服务供需视角的河南省碳平衡研究[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9627-9635.

[11] 贾纪昂, 郭伟玲, 徐刘洋, 等. 耦合PLUS-InVEST-GeoDectetor模型的安徽省碳储量时空演变及驱动力分析[J/OL]. 环境科学, 1-17(2024-06-03)[2024-08-12]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202403132

[12] WANG Q, WATANABE M, OUYANG Z. Simulation of Water and Carbon Fluxes Using BIOME-BGC Model over Crops in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3-4): 209-224.

[13] SHI M, WU H, JIANG P, et al. Cropland Expansion Mitigates the Supply and Demand Deficit for Carbon Sequestration Service Under Different Scenarios in the Future: The Case of Xinjiang[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1182.

[14] ZHAO M, RUNNING S W, NEMANI R R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terrestrial Primary Production to the Accuracy of Meteorological Reanalyses[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2006, 111(G1): 2004JG000004.

[15] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 149-158.

[16] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 等. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3368-3380.

[17] 占涵, 于洋, 吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7260-7272.

[18] 郭茹, 邵光辉, 刘林京, 等. 碳中和导向下基于InVEST模型的城市生态空间系统评价研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(7): 137-141.

[19] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping Ecosystem Service Supply, Demand and Budgets[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

[20] ZHAO C, SANDER H A. Quantifying and Mapping the Supply of and Demand for Carbon Storage and Sequestration Service from Urban Trees[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0136392.

[21] 马中英, 尹锴, 吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析——以沿海城市厦门为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1808-1816.

[22] 孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异[J]. 地理研究, 2012, 31(12): 2220-2228.

[23] 莫金宵. 碳中和背景下基于固碳效应评价及预测的滇中城市群土地利用对策研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2023.

[24] 李迅. “双碳”战略下的城市发展路径思考[J]. 城市发展研究, 2022, 29(8): 1-11.

[25] 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.

[26] 胡昂, 吴侃思, 黄莹, 等. 高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析——以四川省为例[J]. 长江

流域资源与环境, 2022, 31(5): 1062-1076.
[27] 耿瑜爽, 李巍, 乐荣武. 呼包鄂榆城市群耦合空间碳排放生态网络构建[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4086-4097.
[28] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. 地理学报, 2022(3): 679-696.
[29] 刘伟, 张帆, 魏云浩, 等. 珠三角城市群区域生态系统服务供需均衡关系[J]. 生态学报, 2023(11): 4461-4472.
[30] LI W, CHEN Z, LI M, et al. Carbon Emission and Economic Development Trade-offs for Optimizing Land-use Allocation in the Yangtze River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 147: 109950.
[31] 李建豹, 陈红梅, 张彩莉, 等. 长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4090-4100.
[32] 彭双云, 陈明潇, 张老伟, 等. 滇中城市群碳储量时空演变及其对LULC变化的响应[J]. 水土保持学报, 2024(4): 246-256.
[33] RAN Y, LEI D, LI J, et al. Identification of Crucial Areas of Territorial Ecological Restoration Based on Ecological Security Pattern: A Case Study of the Central Yunnan Urban Agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109318.
[34] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 等. 基于InVEST模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 120-128.
[35] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999-2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274.
[36] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
[37] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
[38] REID W V, MOONEY H A, CROPPER A, et al. Ecosystems and Human Well-being-Synthesis: A Report of the Millennium Ecosystem Assessment[M]. Washington D.C.: Island Press, 2005.
[39] 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.
[40] 陈泓文, 巩杰. 陕北黄土高原生态系统服务供需格局及其演变[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 226-232.
[41] LI T, LI J, WANG Y. Carbon Sequestration Service Flow in the Guanzhong-Tianshui Economic Region of China: How It Flows, What Drives It, and Where Could Be Optimized?[J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 548-558.
[42] 云南省人民政府办公厅. 云南省人民政府办公厅关于印发云南省"十四五"区域协调发展规划的通知[EB/OL]. (2022-04-21)[2024-07-30]. https://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxxgkpt/fdzdgknr/zcwj/zfxxgkptyzbf/202204/t20220421_241076.html
[43] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1425-1437.
[44] 郜红娟, 韩会庆, 张朝琼, 等. 乌江流域贵州段2000-2010年土地利用变化对碳储量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(1): 48-53.
[45] 杨静怡, 吴峰. 贵阳市1980-2018年土地覆盖类型及碳储量变化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4): 115-121.
[46] GONZÁLEZ-GARCÍA A, PALOMO I, GONZÁLEZ J A, et al. Quantifying Spatial Supply-demand Mismatches in Ecosystem Services Provides Insights for Land-use Planning[J]. Land Use Policy, 2020, 94: 104493.
[47] 夏沛, 彭建, 徐子涵, 等. 生态系统服务流概念内涵与量化方法[J]. 地理学报, 2024(3): 584-599.
[48] 林奕成, 易扬, 张浪, 等. 基于全生命周期的城市绿地碳源/汇核算研究——以郑州龙湖外环为例[J]. 园林, 2024(8): 140-146.