

特大城市群生态空间及其生态承载状态的时空分异

王世豪^{1,2}, 黄麟³, 徐新良¹, 李佳慧^{2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所

中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 快速城镇化导致中国城市群地区生态空间被大量挤占, 生态承载压力加剧, 已成为制约城市群健康发展的重要因素。本文界定并分析了京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝、长江中游5个特大城市群三生空间结构分布特征, 解析了1990—2020年生态空间时空分异及其变化的影响因素, 进一步通过水资源供给、水质调节、空气质量调节、休闲游憩探讨了近30年生态空间综合承载状态及时空分异特征。研究结果表明: ①不同形成发育阶段的城市群呈现差异性的三生空间面积结构比、以多中心组合为主的生活空间拓展演变模式, 以及屏障式、紧密、离散、全包围式的生态空间结构。②1990—2020年城市群生活空间面积持续大幅度增加而生产空间呈现相反趋势, 除粤港澳大湾区以外, 生态空间均表现出增加态势尤其近10年增势明显。三生空间面积结构及其时空变化特征, 说明特大城市群生产、生态空间的主要功能从供给转向调节和文化, 并反映了中国从快速城镇化到新型可持续城镇化的转变。③5个城市群分别有78.6%、73.1%、54.5%、56.3%和25.8%市域呈现严重超载的综合生态承载状态, 其中水资源供给、水质调节是制约城市群生态承载水平的要因, 未来需要重视城市群生态空间保留量及其合理布局以减缓生态承载压力。本文可为城市群绿色可持续发展、三生空间结构优化和配置提供科学依据。

关键词: 特大城市群; 三生空间结构; 生态空间; 生态承载力; 时空分异

DOI: 10.11821/dlxb202201012

1 引言

生态空间即生态系统所占据的物理空间、其代谢所依赖的区域腹地空间及其功能所涉多维关系空间^[1], 承载着满足人类供给、调节、支持、文化等需求^[2]。城市生态空间是城市内部及周边提供生态系统服务的地表植被及水体等绿色和蓝色空间^[3-5], 具有缓解城市热岛效应、改善大气与水环境质量、提供休闲娱乐场所等功能^[6], 对于保障城市生态安全、提升居民生活质量、保障城市健康发展具有重要作用^[7]。已有研究聚焦城市生态用地需求规模测算、城市生态空间类型识别^[8], 生态空间时空变化特征分析、生态空间占用的人类足迹^[7, 9-10], 结构与服务功能及价值评估^[5, 11-13], 优化与提升、分区与管控^[1, 14]等方面。在单个城市或城市群、中国尺度都开展了生态空间时空变化分析^[6, 9-11], 并得出生态空间

收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2021-07-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20010202, XDA20010302) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20010202, No.XDA20010302]

作者简介: 王世豪(1995-), 男, 山东淄博人, 博士生, 主要从事生态环境遥感与信息系统研究。

E-mail: wangsh.20b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 黄麟(1981-), 女, 四川宜宾人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土地利用变化及其生态效应研究。

E-mail: huanglin@igsnrr.ac.cn

演变过程表现出一定的区域差异和梯度效应,不同区域生态空间变化发生的拐点时间有所不同^[10]。

人口快速增长和经济社会快速发展、城乡建设用地不断扩展^[15],极大地改变了陆地表层覆盖与生态系统结构^[16-17],生态空间被人类活动相关的生产和生活空间大量挤占^[18]、生态空间质量不断下降^[10],污染加剧、生态退化、资源短缺^[19],严重威胁可持续发展和居民生活质量^[20]。特别是城市群地区,作为推动国家重大区域战略与区域板块之间融合互动发展的载体^[21],集中了中国45%的城镇人口、50%经济总量和60%的外资^[21],但同时也集中了中国75%以上的污染产出^[22]。城市群生态空间格局变化影响城市群地区生态环境状况,迅速推进的城市化进程使得城市热岛、水污染、大气污染、城市内涝等大量问题不断发生^[9, 23-25],成为制约城市群健康发展的重要因素^[26-28]。

城市群地区生态承载力,是其生态空间提供生态服务、预防生态问题、保障生态安全的能力^[29],是生态系统结构、过程及其空间格局决定的生态系统服务所能支撑的具有一定发展水平的人口和经济规模^[30],是判断该区域经济社会活动与生态系统协调与否的基础工具^[31]。生态承载力评估多采用生态足迹^[32]、状态空间^[33]、系统模型^[34]、生产力消耗^[35]、生态系统服务消耗^[30]等方法,从定性描述发展到定量分析和机理研究^[36],已应用于长株潭、闽三角、长江中游等城市群的生态承载力研究^[32-34]。基本原理都是利用供需比从供给规模、需求规模上权衡以反映一定空间范围内服务供给与人口需求匹配状况的供需匹配性^[37]。目前,难以量化表征生态系统的供给容纳能力、人类活动与生态系统的相互作用关系,未体现不同区域的生态需求等原因,导致生态承载力评估缺乏针对性并存在极大不确定性^[31]。

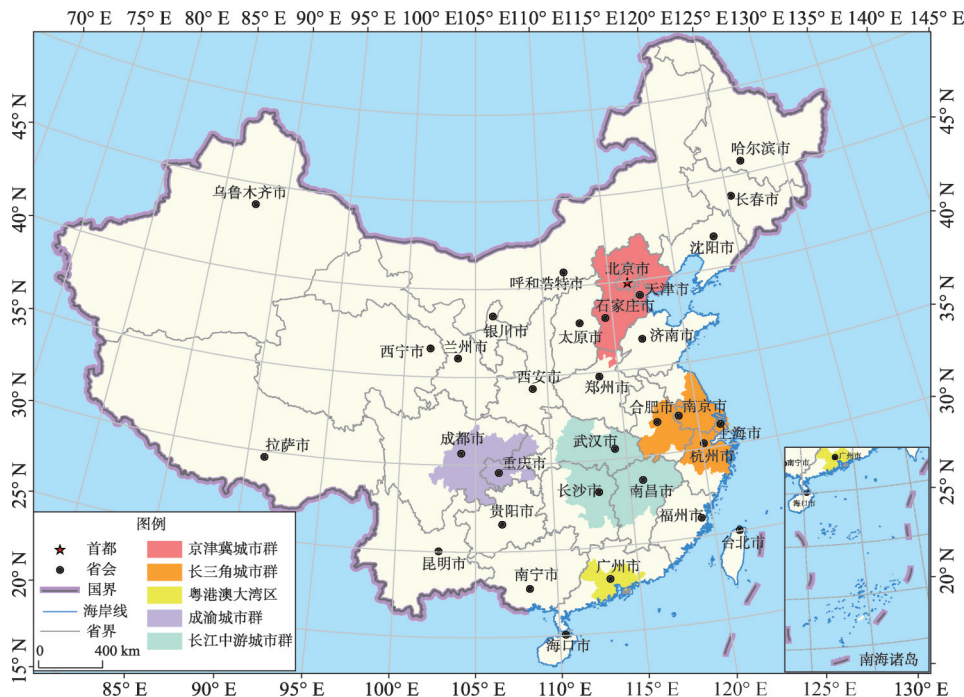
生态空间的数量、布局、承载能力对于改善城市环境、提供宜居和休闲空间、保障城市生态安全等均具有重要意义。但是,城市生产、生活、生态不同空间在规模配比、空间配置、功能融合等方面的不尽协调问题,严重损害城市发展的系统性、宜居性和可持续性^[38]。只有在一定的资源承载力和环境容量支持条件下的生态空间^[1]才能成为城市群地区可持续发展的基础,特别是随着人居环境质量关注度的提升^[39],人对城市生态空间的感知效益越来越受到重视^[7, 40]。因此,依据生态承载力及承载状态、合理优化配置生态空间是统筹解决城镇化与生态保护矛盾的重要途径^[11, 41]。然而,已开展的城市群生态承载研究多从供给入手,较少考虑调节和文化方面,难以体现不同城市群生态空间的实际功能,较少开展生态空间模式及阶段演化过程的对比分析。

特大城市群地区既是新型城镇化和经济发展的主体区和核心区,又是生态问题高度集中的敏感区和重灾区^[21],城市群的发展需要注重生态环境保护和修复,以达到“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的可持续发展目标^[2, 42]。故而,1978年改革开放以来,中国主要城市群地区生态空间存在何种时空变化规律?生态空间受城镇扩张影响及其区域差异如何?如何从需求的角度衡量城市群地区生态空间的承载水平及其状态?生态空间时空变化对生态承载水平有何影响?这些问题亟需深入研究。本文以京津冀、长江三角洲、粤港澳大湾区、成渝、长江中游这5个国家级特大城市群为研究区,参考生态足迹与生态承载力的评估方法改进了生态承载力供需平衡模型以解决前述不足之处,系统开展了生态空间时空变化、城镇扩张占用生态空间以及生态空间承载水平变化的对比分析,评估了1990—2020年生态承载状态变化的限制因素,为生态文明建设背景下城市群空间结构优化和配置、可持续发展提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

京津冀城市群以中国7.3%的人口和2.4%的国土面积产生了10.3%的GDP^[43]，快速城镇化导致水资源短缺、生态系统退化日益严重^[44-45]。长三角城市群以中国11.0%的人口和2.2%的面积产生了18.5%的GDP^[46]，然而资源紧张、环境污染、生态质量持续下降。粤港澳大湾区以中国5.1%的人口和0.6%的面积产生了12.5%的GDP^[47]，引起物种多样性降低、洪涝规模增大^[48]。成渝城市群以中国6.7%的人口和1.9%的面积产生了5.5%的GDP^[49]，然而资源利用率低、生态系统退化、自然灾害频发。长江中游城市群以中国8.8%的人口和3.3%的面积产生了8.8%的GDP^[50]，水资源短缺、土壤污染和水土流失严重^[33]。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1600号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 中国国家级特大城市群地区的空间分布

Fig. 1 Distribution of five mega-urban agglomerations in China

2.2 数据来源与处理

土地利用数据：城市群地区2020年土地利用现状数据和1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年土地利用变化数据源于中国科学院资源环境数据中心（<http://www.resdc.cn>），数据^[51]以美国陆地卫星Landsat TM/ETM或Landsat 8遥感图像为主要信息源，通过人工目视解译获得土地利用类型矢量数据，在此基础上生成的100 m×100 m空间分辨率数据，包括耕地、林地、草地、水体与湿地、城乡建设用地、未利用土地等6个一级类型。二级类型中的乔木林地和疏林地合并统计森林面积作为承载力计算输入数据。

区域统计数据：从5个城市群地区的各市县统计年鉴、水资源公报等公开数据库收集了县/市域人口数量、地表水资源量、用水量（生活、生产、生态）、污水排放量、二氧化硫排放量等数据。

气象观测数据：基于国家气象科学数据共享平台（<http://data.cma.cn>）日均降水日值观测数据，采用ANUSPLIN进行插值得到空间分辨率为1 km×1 km的栅格数据。

遥感反演数据：MODIS NDVI数据（MOD13Q1）（<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>）用以计算植被覆盖度。数据空间分辨率为250 m×250 m，时间分辨率为16 d。利用 Savitzky-Golay 滤波对长时间序列NDVI数据进行处理，以去除云和大气等噪声的影响。

经验参数数据：水资源产量因子^[52]见表1。单点尺度通过已发表文献搜集实测降雨产流临界值，并以临近气象台站实测的日降水量修正同时期得到的TRMM逐日3 h降水量，累计单次降雨量大于降雨产流临界值的数值得到产流降水量占降水总量的比例，进而与多年平均河川径流系数建立线性关系，得到该比例的空间分布。

表1 城市群所涉及省域的区域水资源产量因子
Tab. 1 Yield factors of water resources for provinces related to mega-urban agglomerations

地区	北京	天津	河北	河南	上海	江苏	浙江	安徽	广东	重庆	四川	湖北	江西	湖南
产量因子	0.77	0.41	0.40	0.78	1.39	1.02	2.81	1.54	3.21	2.04	1.76	1.68	2.71	2.45

2.3 研究方法

2.3.1 三生空间信息提取 参考生态空间分类^[53]并基于三生空间和生态系统服务理论^[54]，本文将能直接或间接提供生态系统供给、调节与文化服务且具有一定自我调节、修复、维持和发展能力的森林、草地、水体与湿地作为生态空间，将以经济产出为核心目标的耕地等作为生产空间，将人们用于满足休憩、娱乐、消费等的城乡建设用地作为生活空间。基于土地利用数据，提取5个特大城市群地区的三生空间分布信息，并在此基础上以县域为基本单元，统计分析1990—2020年各城市群地区生态空间面积及其空间分布变化，获取生态、生产、生活空间相互转换的变化信息，分析各县域城镇扩张引起的生活空间占用生态空间状况。

2.3.2 生态系统服务供给与需求量化 城市群地区生态空间可提供的潜在服务主要取决于生态系统自身状况，而对于生态系统服务的需求则取决于经济社会发展水平^[55]。参考城市群地区人类对生态系统服务需求的相关研究^[56-59]，更关注调节、文化、休闲等主观需求和福祉，同时考虑以森林、草地和湿地为主的城市群地区生态空间，本文中生态系统服务以水资源供给、水质调节、空气质量调节、休闲游憩为主。

生态空间的水资源供给量包括水面的水储量和生态系统的水源涵养量。其中，水面的水储量用地表水资源量表示，水源涵养量通常采用水量平衡法和降水贮存量法^[60-61]，前者偏重流域水过程如InVEST模型，但存在蒸散发量测量困难、研究区范围不宜过大等局限性，后者结合森林蒸散发经验值，偏重植被降水截留作用，简易可行且操作性强，本文采用降水贮存量法估算森林、草地、有植被湿地的水源涵养量^[62-64]，公式为：

$$W=A \times Pr \times R$$
 (1)

$$Pr=P \times K$$
 (2)

式中： W 为与裸地相比得到的森林、草地和有植被湿地涵养水分的增加量（ m^3 ）； A 为森林、草地和有植被湿地面积（ hm^2 ）； Pr 为产流降水量（ mm ）； R 为与裸地相比生态系统减少径流的效益系数，根据植被覆盖度计算^[65]； P 为年均降水量（ mm ）； K 为产流降水量占降水总量的比例。

生态空间中可消纳废水的主体为湿地^[66]，比如沼泽湿地减缓废水污水流速以沉淀和排除有毒物质，或湿地植物吸收废水中的有毒物质以净化水质；可吸收大气污染物的主

体为森林^[67], 森林吸收 SO_2 、氮氧化物等有害气体, 且有阻滞粉尘的作用^[60]; 可提供休闲游憩的主体为森林、草地、水体与湿地等绿色和蓝色空间^[68], 即涵盖了城市公园、生态风景区、公共绿地的城市游憩空间, 其功能评价及布局配置等也是当前研究热点^[37, 59, 68]。城市群地区人类对生态系统服务需求的量化采用如下指标和方法: 水资源需求源于生活、生产、生态用水, 利用区域用水量表示; 水质调节需求源于排放的污水, 利用生活和生产污水排放量表示; 空气质量调节需求源于排放的大气污染气体, 本文中仅利用工业 SO_2 排放量表示^[60]; 休闲游憩功能已有研究侧重功能类型及空间分布, 方法多为对公园、风景区等游憩空间点进行样本调查, 本文对于休闲游憩的需求基于人口数量和国家生态园林城市标准人均绿地面积 ($11 \text{ m}^2/\text{人}$) 进行量化。

2.3.3 生态承载状态分析方法 生态承载力常用方法中, 生态足迹法直观简单但模型参数弹性不够, 且缺乏对生态系统多功能性的度量^[31, 69], 综合评价法和系统模型法考虑因素较全面、灵活, 但所需资料较多, 数据可得性往往成为瓶颈, 供需平衡法可用生态系统提供资源量与当前发展模式下社会经济或人口需求之间的差量关系来衡量^[70]。本文参考基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子^[71]与生态承载力供需平衡模型^[72], 改进生态足迹与生态承载力核算方法, 利用潜在生态功能与服务需求之比评价生态空间的生态承载状态。

$$ECSI_i = \frac{EF_i}{ECC_i} \quad (3)$$

式中: $ECSI_i$ 是第 i 类生态服务的生态承载状态指数; EF_i 是生态足迹 (hm^2); ECC_i 是生态承载力 (hm^2)。

水资源承载指数: 将区域用水量 (W) 转化为水资源用地面积计算水资源生态足迹 (EF_{wr}), 将水资源供给量 (WR) 转化为水资源用地面积计算水资源生态承载力 (ECC_{wr}), 即:

$$EF_{wr} = \frac{r_w \times W}{p_w} \quad (4)$$

$$ECC_{wr} = \frac{0.4 \times \phi \times r_w \times WR}{p_w} \quad (5)$$

式中: r_w 为全球水资源均衡因子 (取值为 $5.19^{[52]}$); p_w 为全球水资源平均生产能力 (取值为 $3140 \text{ t/hm}^2^{[73]}$), 0.4 为扣除 60% 用于维持生态环境和生物多样性的水资源量^[74-75]; ϕ 为水资源产量因子。

水质调节承载指数: 利用区域污水排放量 (C_{wc}) 消纳所需湿地面积计算水质调节生态足迹 (EF_{wc}), 将湿地水源涵养量 (WR_w) 转化为水资源用地面积计算水质调节承载力 (ECC_{wc}), 即:

$$EF_{wc} = \frac{r_w \times C_{wc}}{p_{wc}} \quad (6)$$

$$ECC_{wc} = \frac{0.4 \times \phi \times r_w \times WR_w}{p_{wc}} \quad (7)$$

式中: p_{wc} 为单位面积水域对污水的平均消纳量 (取值为 $365 \text{ t/hm}^2^{[76]}$)。

空气质量调节承载指数: 利用吸收区域 SO_2 排放量 (E_{SO_2}) 所需的森林面积计算空气质量调节生态足迹 (EF_{aq}), 空气质量调节生态承载力 (ECC_{aq}) 由区域森林面积表示, 即:

$$EF_{aq} = \frac{E_{\text{SO}_2}}{p_{aq}} \quad (8)$$

式中： p_{aq} 为森林对SO₂的平均吸收能力（取值为88.65 kg/hm²^[77]）。

休闲游憩生态承载计算：区域人口数（ N ）所需绿地面积即休闲游憩生态足迹（ EF_r ），区域生态空间面积即休闲游憩生态承载力（ ECC_r ）。

生态承载状态分析：利用式（3）分别计算区域水资源供给、水质调节、空气质量调节、休闲游憩的承载状态指数，指数越高表明该项承载压力越大。为了能够定性分析与评价特大城市群地区各市生态承载状态差异以及变化情况，参考土地资源承载力研究中采用的分级方案^[78]，将生态承载指数划分为非常盈余、盈余、平衡、超载和严重超载（表2）。然后，应用“木桶效应”，取4项生态承载力的最小值作为区域生态承载力阈值，评价特大城市群生态承载状态。生态承载状态指数越高，表明承载压力越大，处于超载状态，而生态承载状态指数越低，表明承载压力越小，处于生态承载盈余状态。

表2 生态承载状态分级
Tab. 2 Classification for ecological carrying capacity

生态系统服务项	生态承载状态及阈值				
	非常盈余	盈余	平衡	超载	严重超载
水资源供给	0~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~5	> 5
水质调节	0~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~5	> 5
空气质量调节	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1.5	1.5~10	> 10
休闲游憩	0~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~10	> 10

3 结果与分析

3.1 特大城市群三生空间结构分布特征

从三生空间面积结构、生活空间扩展演变模式以及生态空间结构类型三个方面分析特大城市群空间结构分布特征。2020年，从“生态—生产—生活”空间面积结构比来看（表3），京津冀和长三角为4:5:1，成渝约为3:6:1，生产空间占比最高，其中成渝为59.7%，生态空间面积占比约为36.4%；粤港澳约为6:2:2，长江中游约为6:3:1，生态空间占比最高，分别达到了63.3%和60.0%。生活空间面积占比最大的是粤港澳、长三角和京津冀，分别为14.8%、14.0%和13.2%，成渝和长江中游较小，约为3.9%和4.5%。

参考城市群形成发育规律^[79]，从生活空间结构分布特征来看，除成渝是双中心组合以外，其余4个特大城市群以多中心组合为主，而从生活空间拓展演变规律来看，城市群空间拓展遵循由“煮蛋”（多蛋独煮、立体生长、互不干扰）—“摊蛋”（多蛋平摊、平面延展、空间冲突）—“炒蛋”（多蛋共炒、功能重塑、分工重组）的“蛋型”演变规律，形成多个城市有机联系、相互依存、相互促进的有机融合体^[80]，其中长江中游是“煮蛋”模式（图2e），成渝为“摊蛋”模式（图2d），而京津冀、长三角、粤港澳则是

表3 2020年中国特大城市群生态、生产、生活空间面积统计
Tab. 3 The statistics of ecological-production-living spaces in mega-urban agglomerations in 2020

类别	统计指标	京津冀	长三角	粤港澳	成渝	长江中游
生态空间	面积(10 ⁶ hm ²)	9.04	8.47	3.49	7.02	20.96
	面积占比(%)	40.54	40.16	63.33	36.38	59.96
生产空间	面积(10 ⁶ hm ²)	10.33	9.68	1.20	11.53	12.42
	面积占比(%)	46.31	45.87	21.83	59.74	35.53
生活空间	面积(10 ⁶ hm ²)	2.93	2.95	0.82	0.75	1.58
	面积占比(%)	13.15	13.97	14.84	3.88	4.51

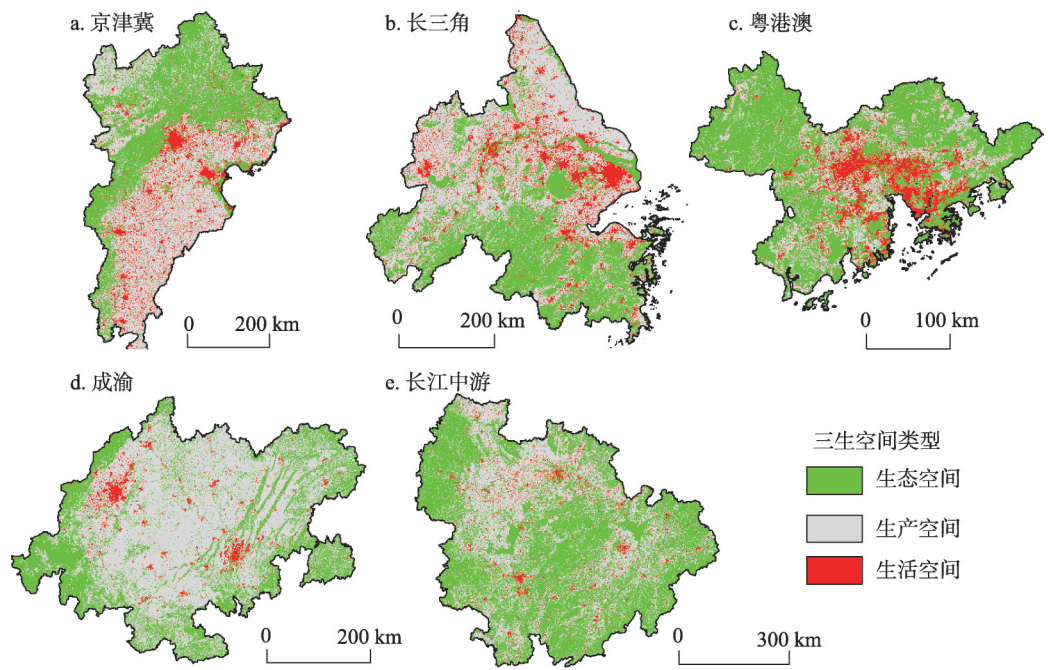


图2 2020年特大城市群生态、生产、生活空间分布
Fig. 2 Distribution of ecological-production-living space in mega-urban agglomerations, 2020

炒蛋模式(图2a、2b、2c)。特大城市群的生态空间结构分布特征亦不相同,京津冀(北部、西部)和长三角(南部)呈现屏障式生态空间,另外3个城市群为包围式,区别在于粤港澳是紧密包围式、成渝是离散包围式而长江中游为全包围式。

3.2 特大城市群生态空间时空变化分异

1990—2020年5个特大城市群生活空间面积皆持续大幅度增加、生产空间面积皆持续大幅度减少,导致生态空间面积变化存在差异(图3)。除粤港澳外,其他城市群生态空间多呈现增加态势,且2010—2020年增势明显。其中,京津冀1990—2010年持续减少、2010—2020年大幅增加,长三角和长江中游持续大幅度增加,粤港澳1990—2000年微增而2000—2020年持续减少,成渝1990—2000年微减而2000—2020年增加。30年

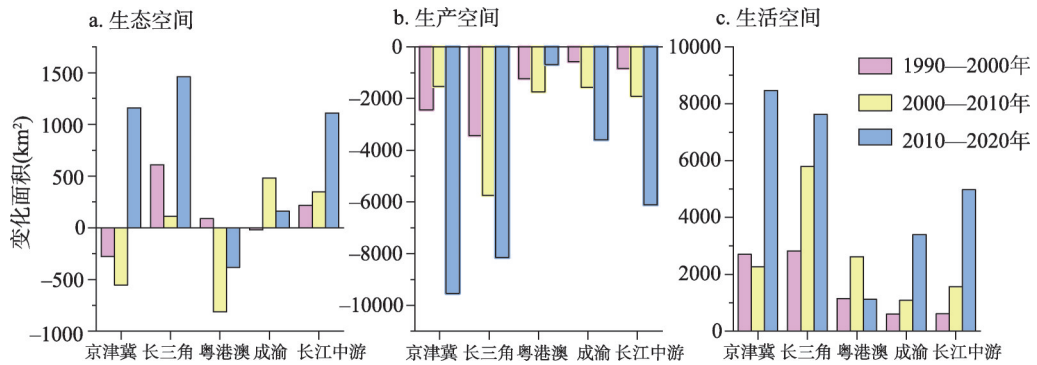


图3 1990—2020年特大城市群生态、生产、生活空间面积变化统计
Fig. 3 The area changes of ecological-production-living space in mega-urban agglomerations, 1990-2020

间，特大城市群生活空间的增加主要源于挤占生产空间，但生活空间挤占生态空间的比例在逐渐增加。1990—2000年生活空间挤占生态空间比例较小，2000—2010年减少的生态空间超过一半被生活空间挤占，2010—2020年，生态空间的减少基本为生活空间占用（表4）。

1990—2000年京津冀和成渝的生态空间总面积减少，分别约43.1%和54.2%的县域生态空间减少，而长三角、粤港澳和长江中游生态空间总面积皆有增加，分别约62.8%、42.9%和47.6%的县域生态空间增加（图4a、表4）。粤港澳生活空间挤占生态空间现象凸显，约占生态空间减少面积的72.2%，其中34.7%的县域生活空间挤占生态空间比例大于90%（图5a），而京津冀、长三角、长江中游、成渝生活空间挤占生态空间比例不足30%。

表4 1990—2020年特大城市群生态空间变化统计
Tab. 4 Statistics of ecological space and its changes in mega-urban agglomerations during 1990-2020

时段	统计指标	京津冀	长三角	粤港澳	成渝	长江中游	
1990—2000年	生态空间面积变化(hm ²)	-27799	60925	8806	-2235	21633	
	面积变化比例(%)	-0.12	0.29	0.17	-0.01	0.06	
	生态空间增加的县域占比(%)	31.75	62.80	42.86	39.58	47.60	
	生态空间不变的县域占比(%)	25.12	7.25	2.04	6.25	0.00	
	生态空间减少的县域占比(%)	43.13	29.95	55.10	54.17	52.40	
	生活空间挤占生态空间面积(hm ²)	27775	15998	43675	2346	17425	
	生活空间挤占生态空间比例(%)	32.96	24.06	72.22	13.11	23.66	
	生活空间挤占生态	≥ 90	6.64	16.43	34.69	11.11	8.30
	空间各比例范围,	50~90	12.32	17.39	24.49	9.72	17.03
	城市群县域的数量	< 50	43.60	41.06	36.73	66.67	74.24
	占比(%)	无占用	37.44	25.12	4.08	12.50	0.44
2000—2010年	生态空间面积变化(hm ²)	-55291	10889	-81350	48152	34822	
	面积变化比例(%)	-0.28	0.02	-1.55	0.25	0.10	
	生态空间增加的县域占比(%)	23.70	39.61	20.41	74.31	58.08	
	生态空间不变的县域占比(%)	26.07	4.35	2.04	2.78	0.44	
	生态空间减少的县域占比(%)	50.24	56.04	77.55	22.92	41.48	
	生活空间挤占生态空间面积(hm ²)	43500	49811	116735	7754	50685	
	生活空间挤占生态空间比例(%)	53.45	63.46	99.03	69.37	60.46	
	生活空间挤占生态	≥ 90	38.86	52.17	97.96	70.83	50.66
	空间各比例范围,	50~90	10.90	21.74	0.00	5.56	22.27
	城市群县域的数量	< 50	12.80	19.32	0.00	6.25	24.45
	占比(%)	无占用	37.44	6.76	2.04	17.36	2.62
2010—2020年	生态空间面积变化(hm ²)	115946	146102	-38333	16079	110911	
	面积变化比例(%)	0.50	0.52	-0.76	0.09	0.32	
	生态空间增加的县域占比(%)	52.61	68.12	48.98	77.78	66.81	
	生态空间不变的县域占比(%)	2.84	0.97	0.00	0.00	0.00	
	生态空间减少的县域占比(%)	44.55	30.92	51.02	22.22	33.19	
	生活空间挤占生态空间面积(hm ²)	12756	39322	25037	13551	101289	
	生活空间挤占生态空间比例(%)	83.38	79.08	96.65	93.26	95.67	
	生活空间挤占生态	≥ 90	42.65	71.01	81.63	81.94	82.10
	空间各比例范围,	50~90	4.74	8.21	10.20	4.86	12.66
	城市群县域的数量	< 50	3.32	6.76	0.00	4.17	1.75
	占比(%)	无占用	49.29	14.01	8.16	9.03	3.49

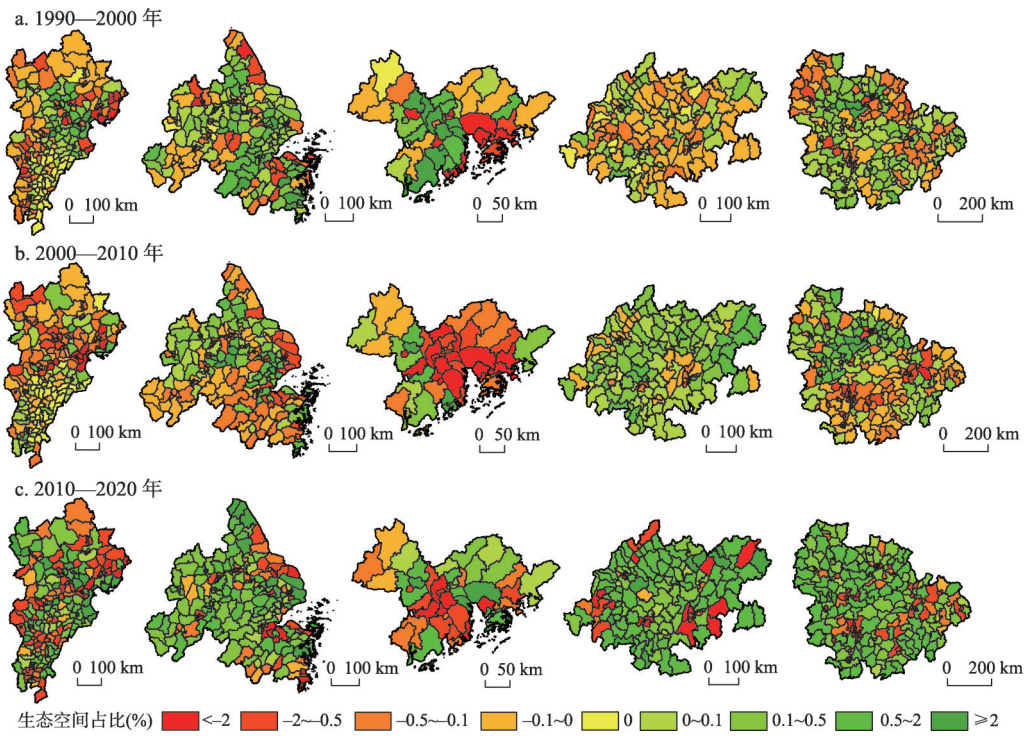


图 4 特大城市群县域尺度生态空间面积占比变化

Fig. 4 The proportion changes of ecological space at county scale in mega-urban agglomerations

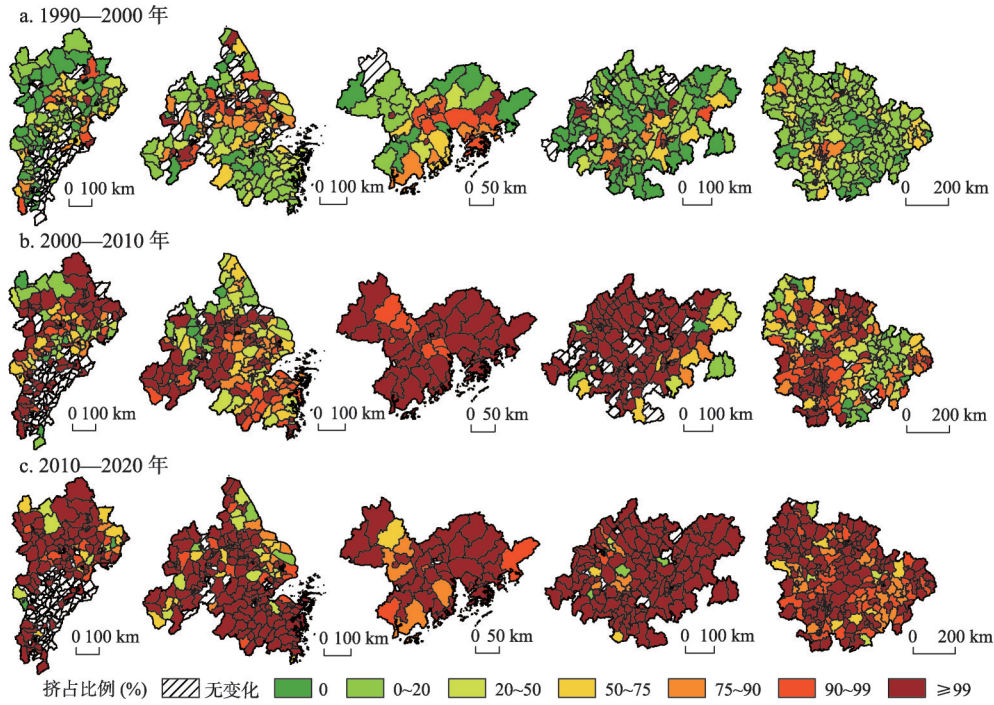


图 5 特大城市群县域尺度生活空间挤占生态空间比例

Fig. 5 The proportion of ecological space occupied by living space in mega-urban agglomerations

2000—2010年京津冀和粤港澳的生态空间总面积减少,其中分别约50.2%和77.6%的县域生态空间减少,而长三角、成渝和长江中游生态空间总面积皆有增加,分别约39.6%、74.3%和58.1%的县域生态空间增加(图4b、表4)。粤港澳生活空间挤占生态空间的面积占比高达99.0%,其次是成渝、长三角和长江中游,分别约69.4%、63.5%和60.5%,京津冀最低约53.5%。生活空间挤占生态空间比例大于90%的县域数量在粤港澳高达98.0%,成渝约70.8%,而京津冀最低仅39.0%(图5b)。

2010—2020年粤港澳生态空间总面积减少,约51.0%县域生态空间减少,而京津冀、长三角、成渝和长江中游生态空间都有所增加,分别约52.6%、68.1%、77.8%和66.8%的县域生态空间增加(图4c、表4)。各城市群生活空间挤占生态空间的比例继续升高,粤港澳、长江中游和成渝均超过90%,京津冀、长三角也超过80%,但除成渝以外,各城市群生活空间挤占生态空间的面积明显减少。生活空间挤占生态空间比例大于90%的县域数量,粤港澳、成渝和长江中游皆超过80%。此外,城镇化水平较高的主城区,生态空间面积极少,因此生态空间被挤占比例接近零(图5c)。

3.3 生态空间生态承载状态时空变化特征

从生态空间综合承载现状来看(图6e),特大城市群地区的96个市域中,约78.1%市域处于超载或严重超载状态,其中,京津冀、长三角、粤港澳、成渝和长江中游城市群分别有78.6%、73.1%、54.5%、56.3%和25.8%的市域表现为严重超载,主要分布在京津冀东部和南部、长三角东部和北部、成渝中西部以及粤港澳的珠江口;仅6.2%的市域呈现盈余或非常盈余的状态,即长江中游南昌城市圈和粤港澳的肇庆;15.6%市域表现为平衡状态,以长三角东南、长江中游为主。分析单项承载状态,水资源承载状态在约70.8%市域呈现超载或严重超载状态、18.8%市域呈现盈余或非常盈余状态(图6a);水质调节承载状态在59.4%市域超载或严重超载、13.6%表现为盈余或非常盈余(图6b);空气质量调节承载状态在34.4%市域超载或严重超载、45.8%市域盈余或非常盈余(图6c);休闲游憩服务承载状态在57.3%市域超载或严重超载、30.2%市域盈余或非常盈余。

1990—2020年各城市群地区生态空间综合承载状态在71.9%市域维持超载不变,7.3%市域的超载状态趋于缓和甚至转为盈余,4.2%市域超载状态加重,特别是粤港澳东南部、成渝北部(图7e)。从单项生态承载状态来看,水资源供给承载在62.5%市域保持原有超载状态不变,在成渝北部和南部等5.2%市域的超载状态升级,而在京津冀中部、粤港澳等约6.3%市域的超载状态趋于缓和(图7a)。水质调节承载在37.5%市域维持超载不变,长江中游西南部等15.6%市域的超载状态趋于缓和,14.6%市域由盈余或平衡趋向超载或严重超载(图7b)。空气质量调节承载在京津冀西南部、成渝东部和南部、长江中游北部等27.1%市域的超载状态趋于缓和,京津冀中西部、长三角东南部、成渝北部以及长江中游中部等35.4%市域承载状态由超载或平衡变为盈余(图7c)。休闲游憩服务承载在47.9%市域维持超载不变,26.0%市域维持盈余不变,8.3%市域超载状态加重,主要分布于京津冀天津、保定,粤港澳东南部以及成渝重庆等地,而超载状态缓解和盈余状态好转的市域极少,仅占1.0%(图7d)。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文系统分析了1990—2020年京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝、长江中游特大城市群的三生空间特别是生态空间时空变化过程,并探讨了水资源供给、水质调节、空气质量调节和休闲游憩等生态承载水平变化差异。结果显示5个特大城市群三生空间

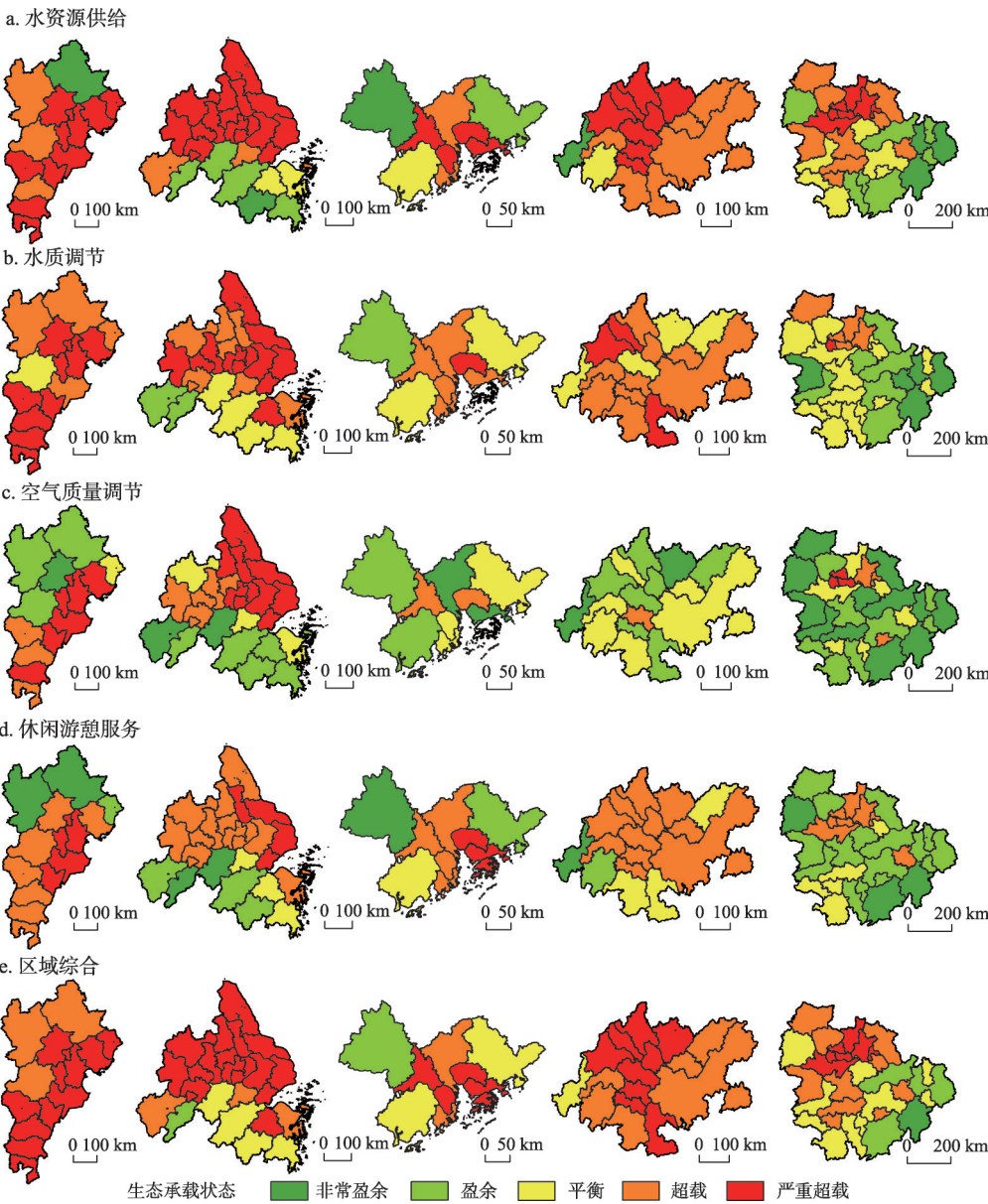


图6 特大城市群生态空间生态承载状态现状空间分布

Fig. 6 Distribution of ecological carrying capacity of ecological space in mega-urban agglomerations

结构差异显著,呈现4种“生态—生产—生活”空间面积结构比、3种以多中心组合为主的生活空间拓展演变模式,以及4种生态空间结构类型。1990—2020年特大城市群生活空间面积皆持续大幅度增加、生产空间面积皆持续大幅度减少,而生态空间面积变化差异明显,除粤港澳外,城市群均表现出生态空间增加态势,且2010—2020年增势明显。1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年生活空间挤占生态空间比例逐渐增加,反映了特大城市群的生产、生态空间功能从供给转向调节和文化。5个城市群分别有78.6%、73.1%、54.5%、56.3%和25.8%市域综合生态承载状态呈现为严重超载,其中水资源供给和水质调节是制约城市群生态承载水平的要因。

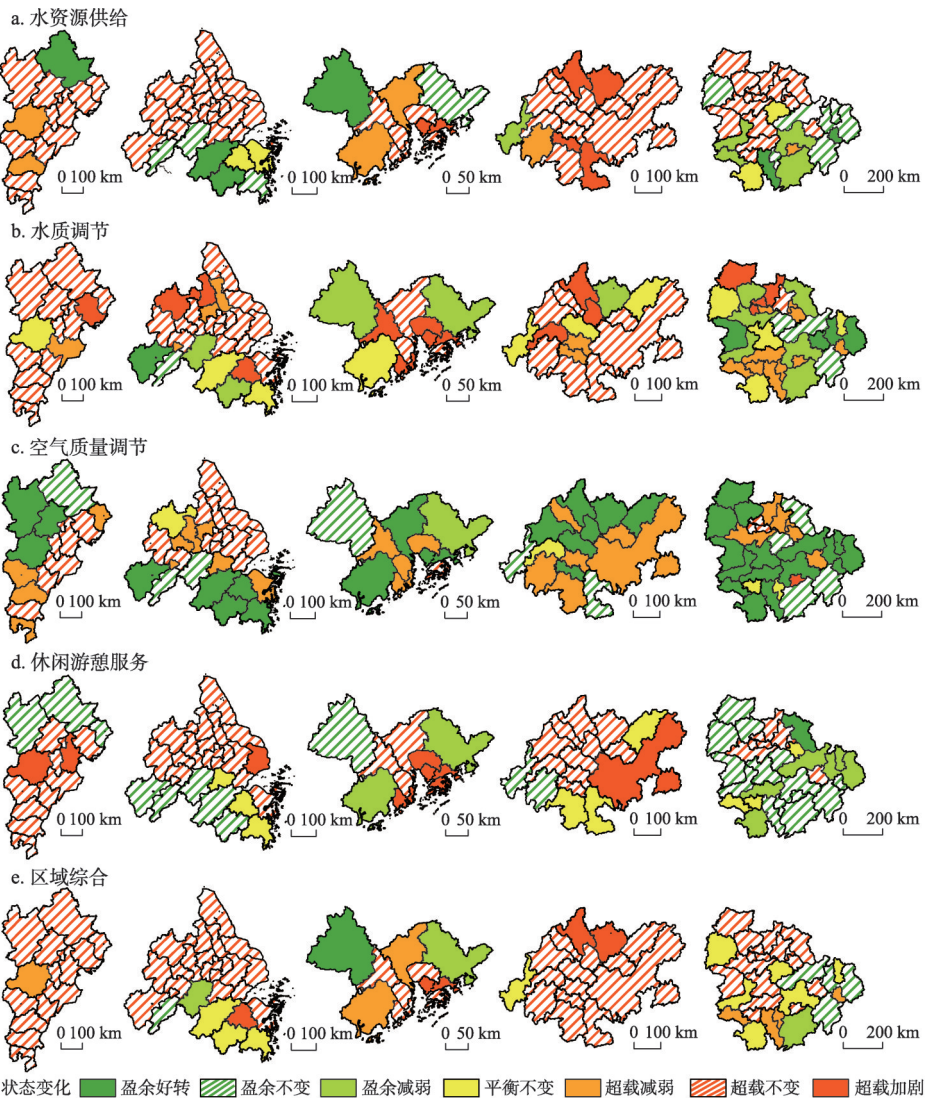


图7 1990—2020年特大城市群生态空间生态承载状态变化的空间分布

Fig. 7 Distribution of the change of ecological carrying capacity in mega-urban agglomerations in 1990-2020

4.2 讨论

与已有研究对比可以看出，采用综合评价指标体系法评估长江中游生态承载力得到水资源供给和污染生态承载状态结果与本文基本一致^[33]；采用水量平衡方程计算京津冀重点生态功能区水源涵养量^[29]，由于评估方法不同，评估结果与本文存在差异；长三角4个典型城市生态足迹研究表明人均生态足迹和生态压力指数均呈现上升趋势，表明人类活动对自然生态系统压力在增大，可持续发展状况并不乐观^[81]，这与本文结果呼应。本文存在几个方面的不确定性：① 本文从宏观角度进行了三生空间划分，并未考虑土地的多功能性，基于土地利用类型的面积估算仅考虑水平差异、未考虑垂直结构，同时，受限于数据空间分辨率也未考虑城市群内部生态空间，有待更精细尺度的深入研究。② 利用水资源供给、空气质量、水质和休闲游憩服务的生态承载指数评价其生态承载水平是否超载或盈余，未考虑生物物理和生物化学过程方面的相互关系、生态系统结构与功能

组合差异,也未考虑生态服务的区域间流动和不同人群对于生态空间的需求。③ 空气质量调节只考虑 SO_2 吸收,未纳入其他污染物,湿地的水质净化功能在不同区域因地形、景观格局、水深水流、温度、降雨、污染浓度等因素的影响而表现不同,尚需深入开展多维度、多组合、多功能的生态承载力评估。④ 现阶段看来,生态系统功能及其潜在服务的测算方法是合理的,但其局限于采用行政区域的供需关系而未考虑供需端的流动特征及其受益范围差异。

特大城市群是中国经济发展的战略核心区和新型城镇化的主体区^[21],城镇化水平高、经济规模大,综合实力强,未来发展仍然要以经济建设为主,但在城镇化过程中也要兼顾生态环境的保护,加强空间管控、优化空间布局。生态空间作为城市群地区生态系统服务的主要提供者,必须尊重在自然规律和供需平衡的原则下,推进生态建设的一体化和景观生态结构的同构同建,实现共享自然环境的生态共建共享目标^[82]。开展生态空间生态承载状态的分项与综合评估,有助于我们了解城市群地区生态承载的限制因素,对于超载甚至严重超载的市域,在城镇提质增效过程中需要着重考虑限制因素的影响,有的放矢规划和布局生态空间,以绿色、低碳、宜居为目标,走中国特色的生态、绿色、可持续城镇化道路^[83]。

参考文献(References)

- [1] Wang Rusong, Li Feng, Han Baolong, et al. Urban eco-complex and eco-space management. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 1-11. [王如松,李锋,韩宝龙,等.城市复合生态及生态空间管理.生态学报,2014,34(1): 1-11.]
- [2] Li Guangdong, Fang Chuanglin. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 49-65. [李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析.地理学报,2016,71(1): 49-65.]
- [3] Wang Fuyuan, Wang Kaiyong, Chen Tian, et al. Progress and prospect of research on urban ecological space. *Progress in Geography*, 2017, 36(2): 207-218. [王甫园,王开泳,陈田,等.城市生态空间研究进展与展望.地理科学进展,2017,36(2): 207-218.]
- [4] Ngom R, Gosselin P, Blais C. Reduction of disparities in access to green spaces: Their geographic insertion and recreational functions matter. *Applied Geography*, 2016, 66: 35-51.
- [5] Li Feng, Wang Rusong. Research advance in ecosystem service of urban green space. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 527-531. [李锋,王如松.城市绿色空间生态服务功能研究进展.应用生态学报,2004,15(3): 527-531.]
- [6] Dong Yawen, Zhou Wen, Zhou Lan, et al. Ecological protection in urbanization distinct: A case study of Nanjing city, Jiangsu province. *Urban Research*, 1999(2): 6-8, 10. [董雅文,周雯,周岚,等.城市化地区生态防护研究:以江苏省、南京市为例.城市研究,1999(2): 6-8,10.]
- [7] Zhao Meng, Zhang Xueqi, Zhang Yonglin, et al. Research on the improvement of urban ecological space service base on landsense ecology: A case study in Shunyi District, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(22): 8075-8084. [赵萌,张雪琦,张永霖,等.基于景感生态学的城市生态空间服务提升研究:以北京市顺义区为例.生态学报,2020,40(22): 8075-8084.]
- [8] Peng Jian, Wang An, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 333-346. [彭建,汪安,刘彦序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望.地理学报,2015,70(2): 333-346.]
- [9] Wang Ge, Yu Qiang, Yang Di, et al. Relationship between change of ecological spatial pattern and land surface temperature in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Transactions of the CSAM*, 2021, 52(1): 209-218. [王戈,于强, YANG Di, 等.京津冀城市群生态空间格局变化与地表温度关系研究.农业机械学报,2021,52(1): 209-218.]
- [10] Yin Jiadi, Dong Jinwei, Kuang Wenhui, et al. Pattern and gradient effects of ecological space changes in China since 1990s. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 5904-5914. [殷嘉迪,董金玮,匡文慧,等.20世纪90年代以来中国生态空间演化的时空格局和梯度效应.生态学报,2020,40(17): 5904-5914.]
- [11] Li Feng, Ye Yaping, Song Bowen, et al. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: A case study in Changzhou City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623-5631. [李锋,叶亚平,宋博文,等.城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变:以常州市为例.生态学报,2011,31(19): 5623-5631.]

- [12] Zhao Jingzhu. Dynamic indicator system for measurement of spatial pattern in landscape ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 10(2): 182-186. [赵景柱. 景观生态空间格局动态度量指标体系. *生态学报*, 1990, 10(2): 182-186.]
- [13] Li He, Yang Peifeng. Value evaluation of urban natural ecological space and planning implications. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2014, 27(5): 39-43. [李荷, 杨培峰. 城市自然生态空间的价值评估及规划启示. *城市环境与城市生态*, 2014, 27(5): 39-43.]
- [14] He Mei. *Ecological Spatial System Planning and Management Study of Megacity*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. [何梅. 特大城市生态空间体系规划与管控研究. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.]
- [15] Liu Ji yuan, Liu Wenchao, Kuang Wenhui, et al. Remote sensing-based analysis of the spatiotemporal characteristics of built-up area across China based on the Plan for Major Function-oriented Zones. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 355-369. [刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析. *地理学报*, 2016, 71(3): 355-369.]
- [16] Zeng Jie, Li Jiangfeng, Yao Xiaowei. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan urban agglomeration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 883-891. [曾杰, 李江风, 姚小微. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 883-891.]
- [17] Zhang Zhou, Wu Cifang, Tan Rong. Application of ecosystem service value in land use change research: Bottlenecks and prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 556-562. [张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 556-562.]
- [18] Rong Yi, Li Chao, Xu Ce, et al. Ecosystem service values and spatial differentiation changes during urbanization: A case study of Huanghua city. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1374-1381. [荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381.]
- [19] Lu Dadao, Chen Mingxing. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)". *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 179-185. [陆大道, 陈明星. 关于“国家新型城镇化规划(2014—2020)”编制大背景的几点认识. *地理学报*, 2015, 70(2): 179-185.]
- [20] Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua, et al. Ecological baseline for Beijing's urban sprawl: Basic ecosystem services and their security patterns. *City Planning Review*, 2010, 34(2): 19-24. [俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线: 基本生态系统服务及其安全格局. *城市规划*, 2010, 34(2): 19-24.]
- [21] Fang Chuanglin, Zhou Chenghu, Gu Chaolin, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531-550. [方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.]
- [22] Fang Chuanglin. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144. [方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向. *地理学报*, 2014, 69(8): 1130-1144.]
- [23] Gunawardhana L N, Kazama S, Kawagoe S. Impact of urbanization and climate change on aquifer thermal regimes. *Water Resources Management*, 2011, 25(13): 3247-3276.
- [24] Liu Zhenhuan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Using ISA to analyze the spatial pattern of urban land cover change: A case study in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 961-971. [刘珍环, 王仰麟, 彭建, 等. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征: 以深圳市为例. *地理学报*, 2011, 66(7): 961-971.]
- [25] Wang Shaojian, Fang Chuanglin, Wang Yang. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2244-2254. [王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254.]
- [26] Li G D, Fang C L, Wang S J, et al. The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations in China. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(21): 11452-11459.
- [27] Ren Yufei, Fang Chuanglin. Spatial pattern and evaluation of eco-efficiency in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 87-98. [任宇飞, 方创琳. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 87-98.]
- [28] Kuang Wenhui, Liu Ji yuan, Lu Dengsheng. Pattern of impervious surface change and its effect on water environment in the Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1486-1496. [匡文慧, 刘纪远, 陆灯盛. 京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应. *地理学报*, 2011, 66(11): 1486-1496.]
- [29] Xu Weihua, Yang Yanying, Zhang Lu, et al. Evaluation methods and case study of regional ecological carrying capacity for early-warning. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 306-312. [徐卫华, 杨琰琰, 张路, 等. 区域生态承载力预警评估方法及案例研究. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 306-312.]
- [30] Cao Zhi, Min Qingwen, Liu Moucheng, et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content,

- assessment model and application. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 1-11. [曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11.]
- [31] Zhao Dongsheng, Guo Caiyun, Zheng Du, et al. Review of ecological carrying capacity. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 399-410. [赵东升, 郭彩贇, 郑度, 等. 生态承载力研究进展. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.]
- [32] Wei Liling, Li Lanbin, Lin Yue, et al. Evaluation of the ecological security of Urban Agglomeration on Min Delta based on ecological footprint. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4317-4326. [魏黎灵, 李岚彬, 林月, 等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价. *生态学报*, 2018, 38(12): 4317-4326.]
- [33] Shen Wei, Lu Fengxian, Qin Yaochen, et al. Analysis of temporal-spatial patterns and influencing factors of urban ecosystem carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3937-3951. [沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(11): 3937-3951.]
- [34] Zhu Yulin, Li Mingjie, Gu Ronghua. Security prewarning and regulation of ecological carrying capacity of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration based on press-state-response model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(12): 2057-2064. [朱玉林, 李明杰, 顾荣华. 基于压力—状态—响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(12): 2057-2064.]
- [35] Haberl H, Krausmann F, Erb K H, et al. Human appropriation of net primary production. *Science*, 2002, 296(5575): 1968-1969.
- [36] Du W P, Yan H M, Yang Y Z, et al. Evaluation methods and research trends for ecological carrying capacity. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(2): 115-124.
- [37] Wang Fuyuan, Wang Kaiyong, Liu Hanchu. Evaluation and influence factors of spatial accessibility of ecological space recreation service in the Pearl River Delta Urban Agglomeration: A modified Two-step Floating Catchment Area method. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3622-3633. [王甫园, 王开泳, 刘汉初. 珠三角城市群生态空间游憩服务供需匹配性评价与成因分析: 基于改进的两步移动搜索法. *生态学报*, 2020, 40(11): 3622-3633.]
- [38] Liu Pengfei, Sun Bindong. The spatial pattern of urban production-living-ecological space quality and its related factors in China. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 13-24. [刘鹏飞, 孙斌栋. 中国城市生产、生活、生态空间质量水平格局与相关因素分析. *地理研究*, 2020, 39(1): 13-24.]
- [39] Yang Xue, Zhang Wenzhong. Combining natural and human elements to evaluate regional human settlements quality based on raster data: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2141-2154. [杨雪, 张文忠. 基于栅格的区域人居自然和人文环境质量综合评价: 以京津冀地区为例. *地理学报*, 2016, 71(12): 2141-2154.]
- [40] Coon J T, Boddy K, Stein K, et al. Does participating in physical activity in outdoor natural environments have a greater effect on physical and mental wellbeing than physical activity indoors? A systematic review. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1761-1772.
- [41] Su Weizhong, Yang Guishan, Zhen Feng. Ecological land fragmentation and its connectivity with urbanization in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(12): 1309-1317. [苏伟忠, 杨桂山, 甄峰. 长江三角洲生态用地破碎度及其城市化关联. *地理学报*, 2007, 62(12): 1309-1317.]
- [42] The CPC Central Committee, The State Council. National New Urbanization Plan (2014-2020). Xinhua News Agency, 2014-03-16. [中共中央, 国务院. 国家新型城镇化规划(2014—2020). 新华社, 2014-03-16.]
- [43] Political Bureau of the CPC Central Committee. Outline of Beijing-Tianjin-Hebei cooperative development planning. 2015. [中共中央政治局. 京津冀协同发展规划纲要. 2015.]
- [44] Li Xiaoyong, Kuang Wenhui. Spatio-temporal trajectories of urban land use change during 1980-2015 and future scenario simulation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Economic Geography*, 2019, 39(3): 187-194, 200. [李孝永, 匡文慧. 京津冀1980—2015年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟. *经济地理*, 2019, 39(3): 187-194, 200.]
- [45] Bao Chao, He Dongmei. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 58-67. [鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 58-67.]
- [46] NDRC, MHURC. Development Planning of Yangtze River Delta Urban Agglomerations. 2016-06-03. http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/03/content_5079264.htm. [国家发展改革委, 住房城乡建设部. 长江三角洲城市群发展规划. 2016-06-03. http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/03/content_5079264.htm.]
- [47] The CPC Central Committee, The State Council. The development plan for Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. 2019-02-18. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5370836.htm. [中共中央, 国务院. 粤港澳大湾区发展规划纲要. 2019-02-18. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5370836.htm.]

- [48] Lin Meizhen, Zhou Rubo, Zhong Liang. Research on the changes of ecosystem services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on the change of landscape pattern. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 18(2): 87-95. [林媚珍, 周汝波, 钟亮. 基于景观格局变化的粤港澳大湾区生态系统服务变化研究. *广州大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(2): 87-95.]
- [49] National Development and Reform Commission, MHURC. Development Planning of Chengdu-Chongqing City Group. 2016-04-27. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201605/t20160504_962182.html. [国家发展改革委, 住房城乡建设部. 成渝城市群发展规划. 2016-04-27. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201605/t20160504_962182.html.]
- [50] National Development and Reform Commission. Development Planning of the middle reaches of the Yangtze River. 2015-04-13. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/xxczhjs/ghzc/201605/t20160512_971938.html. [国家发展改革委. 长江中游城市群发展规划. 2015-04-13. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/xxczhjs/ghzc/201605/t20160512_971938.html.]
- [51] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [52] Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286. [黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.]
- [53] Liu Jilai, Liu Yansui, Li Yurui. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of "production-living-ecological" spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1290-1304. [刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析. *地理学报*, 2017, 72(7): 1290-1304.]
- [54] Fu Bojie, Yu Dandan, Lyu Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 341-348. [傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.]
- [55] Zhang Biao, Xie Gaodi, Xiao Yu, et al. Classification of ecosystem services based on human demand. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(6): 64-67. [张彪, 谢高地, 肖玉, 等. 基于人类需求的生态系统服务分类. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(6): 64-67.]
- [56] Li Feng, Wang Rusong, Zhao Dan. Urban ecological infrastructure based on ecosystem services: Status problems and perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 190-200. [李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. *生态学报*, 2014, 34(1): 190-200.]
- [57] Yan Yan, Zhu Jieyuan, Wu Gang, et al. Review and prospective applications of demand, supply, and consumption of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2489-2496. [严岩, 朱捷缘, 吴钢, 等. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.]
- [58] Wu Xiao, Zhou Zhongxue. Spatial relationship between supply and demand of ecosystem services through urban green infrastructure: Case of Xi'an City. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9211-9221. [吴晓, 周忠学. 城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系: 以西安市为例. *生态学报*, 2019, 39(24): 9211-9221.]
- [59] Yu Ling, Liu Jiaming, Li Tao, et al. Research progress of urban public recreational space in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1923-1941. [余玲, 刘家明, 李涛, 等. 中国城市公共游憩空间研究进展. *地理学报*, 2018, 73(10): 1923-1941.]
- [60] Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491. [赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.]
- [61] Jiang Wenlai. Theory and method to accounting value of forest water conservative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 34-36, 40. [姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 34-36, 40.]
- [62] Jiang Lipeng, Qin Zhihao, Xie Wen, et al. Estimation of grassland ecosystem services value of China using remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 161-170. [姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 161-170.]
- [63] Liu Junhui, Gao Jixi. Measurement and dynamic change of ecosystem services value in the farming-pastoral ecotone of northern China. *Mountain Research*, 2008, 26(2): 145-153. [刘军会, 高吉喜. 北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化. *山地学报*, 2008, 26(2): 145-153.]
- [64] Wu Dan, Shao Quanqin, Liu Jiuyan, et al. Assessment of water regulation service of forest and grassland ecosystems in Three-River headwaters region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 206-210. [吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 206-210.]

- [65] Zhu Lianqi, Xu Shuming, Chen Peiyun. Study on the impact of land use/land cover change on soil erosion in mountainous areas. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 432-438. [朱连奇, 许叔明, 陈沛云. 山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响. *地理研究*, 2003, 22(4): 432-438.]
- [66] Ji Guodong, Sun Tieheng, Li Shun. Constructed wetland and its application for industrial wastewater treatment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 224-228. [籍国东, 孙铁珩, 李顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 224-228.]
- [67] Guo Xudong, Chen Liding, Fu Bojie. Effects of land use/land cover changes on regional ecological environment. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(6): 66-75. [郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 66-75.]
- [68] Sun Kun, Zhong Linsheng, Zhang Aiping, et al. Comparative analysis on the leisure values of urban ecological recreation spaces: A case study of Changshu city. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 256-270. [孙琨, 钟林生, 张爱平, 等. 城市生态游憩空间休闲价值对比分析: 以常熟市为例. *地理研究*, 2016, 35(2): 256-270.]
- [69] Ma Lin, Liu Hao, Peng Jian, et al. A review of ecosystem services supply and demand. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289. [马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289.]
- [70] Xiang Yunyun, Meng Jijun. Research and application advances in ecological carrying capacity. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2958-2965. [向芸芸, 蒙吉军. 生态承载力研究和应用进展. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2958-2965.]
- [71] Guo Hui, Dong Shiwei, Wu Di, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1405-1412. [郭慧, 董士伟, 吴迪, 等. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. *生态学报*, 2020, 40(4): 1405-1412.]
- [72] Liu Dong, Feng Zhiming, Yang Yanzhao. Ecological balance between supply and demand in China using ecological footprint method. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 614-624. [刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 614-624.]
- [73] Min Qingwen, Jiao Wenjun, Cheng Shengkui. Pollution footprint: A type of ecological footprint based on ecosystem services. *Resources Science*, 2011, 33(2): 195-200. [闵庆文, 焦雯珺, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹. *资源科学*, 2011, 33(2): 195-200.]
- [74] Yu Bing, Xu Linyu. Assessment of sustainable development of urban water ecosystems in Dalian. *Resources Science*, 2014, 36(12): 2578-2583. [于冰, 徐琳瑜. 城市水生态系统可持续发展评价: 以大连市为例. *资源科学*, 2014, 36(12): 2578-2583.]
- [75] Liu Shiliang, Zhu Jiali, Xu Jingwei, et al. Effect of urbanization on the ecological footprint and their interactive coupling relationship. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8888-8900. [刘世梁, 朱家骞, 许经纬, 等. 城市化对区域生态足迹的影响及其耦合关系. *生态学报*, 2018, 38(24): 8888-8900.]
- [76] Duan Jin, Kang Muiyi, Jiang Yuan. Improvement of ecological footprint model based on freshwater resource account and pollution accounts. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 953-963. [段锦, 康慕谊, 江源. 基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改进模型. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 953-963.]
- [77] National Environmental Protection Agency. *National Biodiversity Study in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 1998. [国家环境保护局. 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 环境科学出版社, 1998.]
- [78] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Zhang Jing. The land carrying capacity of China based on man-grain relationship. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 865-875. [封志明, 杨艳昭, 张晶. 中国基于人粮关系的土地资源承载力研究: 从分县到全国. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 865-875.]
- [79] Fang Chuanglin, Wang Zhenbo, Ma Haitao. The theoretical cognition of the development law of China's urban agglomeration and academic contribution. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 651-665. [方创琳, 王振波, 马海涛. 中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献. *地理学报*, 2018, 73(4): 651-665.]
- [80] Fang C L. The basic law of the formation and expansion in urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1699-1712.
- [81] Wen Yi, Gao Jun, Xu Di, et al. Analysis on ecological footprint and evaluation of sustainability of typical cities in Yangtze River Delta based on improved parameters. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 312-318, 327. [闻熠, 高峻, 徐迪, 等. 基于改进参数的长三角城市生态足迹分析及其可持续性评价. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 312-318, 327.]
- [82] Fang Chuanglin. Theoretical foundation and patterns of coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 15-24. [方创琳. 京津冀城市群协同发展的理论基础与规律性分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 15-24.]

- [83] Fang Chuanglin. Goal orientation and strategic focus of China's urban development spatial structure optimization. *Urban Development Studies*, 2016, 23(10): 1-10. [方创琳. 中国城市发展空间格局优化的总体目标与战略重点. *城市发展研究*, 2016, 23(10): 1-10.]

Spatio-temporal variation characteristics of ecological space and its ecological carrying status in mega-urban agglomerations

WANG Shihao^{1,2}, HUANG Lin³, XU Xinliang¹, LI Jiahui^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The rapid urbanization of China's urban agglomerations in recent decades has resulted in over-occupied ecological space and increased ecological pressure, which has become an important factor restricting regional healthy development. This paper examines the structure and distribution characteristics of "production-living-ecological" spaces of five mega-urban agglomerations in China, namely, Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), Yangtze River Delta (YRD), Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), Chengdu-Chongqing (CY), and the middle reaches of the Yangtze River (MYR), and analyzes the spatial and temporal variation characteristics of ecological space and the influencing factors of its changes in 1990-2020. Then it explores the comprehensive ecological carrying capacity of water resource supply, water quality regulation, air quality regulation, and leisure and recreation space. The results show that: (1) Urban agglomerations at different developmental stages present different area ratios of the "production-living-ecological" spaces, living space expansion patterns dominated by multi-center combination, and structure of ecological space including barrier type, compact, discrete, and full enveloping type. (2) In the study period, the area of living space in urban agglomerations increased significantly while the area of production space decreased. The ecological space of all the urban agglomerations except the GBA increased. In the last 10 years, the increase of ecological space accelerated significantly. The spatial structure of "production-living-ecological" spaces and its characteristics of spatial and temporal evolution indicate that the main functions of production and ecological space in mega-urban agglomerations have shifted from supply to regulation and culture, and reflect the transition from rapid urbanization to new sustainable urbanization in China. (3) The ecologically overloaded cities in the BTH, YRD, GBA, CY, and MYR account for 78.6%, 73.1%, 54.5%, 56.3%, and 25.8% of the respective urban agglomeration. Water supply and water quality regulation are the main factors that restrict the ecological carrying capacity of BTH and YRD, while leisure and recreation services restrict the ecological carrying status of the GBA and CY urban agglomerations. In the future, we need to pay attention to the conservation and rational layout of ecological space to reduce the ecological pressure in urban agglomerations.

Keywords: mega-urban agglomerations; structure of "production-living-ecological" spaces; ecological space; carrying capacity of ecological space; spatial and temporal differentiation