

DOI: 10.5846/stxb202007141841

张杰, 李清泉, 吴祥茵, 张晨晨, 王敬哲, 邬国锋. 基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8375-8386.

Zhang J, Li Q Q, Wu X Y, Zhang C C, Wang J Z, Wu G F. Evolution of the ecosystem services value and carrying capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on land use changes. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8375-8386.

基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析

张 杰^{1, 2}, 李清泉¹, 吴祥茵³, 张晨晨^{1, 2}, 王敬哲¹, 邬国锋^{1, 3, *}

1 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518060

2 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 518060

3 深圳大学建筑与城市规划学院, 深圳 518060

摘要: 研究粤港澳大湾区土地利用、生态系统服务价值及承载力的时空演变特征是优化大湾区生态系统管理、提升生态质量的重要依据。当前针对大湾区的土地利用变化过程、生态系统服务价值及生态承载力相结合的系统分析仍较少。系统研究了快速城市化背景下粤港澳大湾区的土地利用变化、生态系统服务价值及生态承载力变化。基于高分辨率遥感数据分析粤港澳大湾区 1990—2015 年土地利用变化及特征, 采用当量法评估大湾区的生态系统服务价值, 基于生态足迹法评估大湾区的生态承载力变化。结果表明: 1990—2015 年大湾区内建设用地增加, 耕地、林地、湿地及未利用地面积逐渐减少; 建设用地的增加主要来源于耕地、林地、水域及未利用地等的转化。伴随着剧烈的土地利用变化, 大湾区的生态系统服务价值从 1990 年的 6385.09 亿元减少到 2015 年 6183.89 亿元, 减少了 3.15%。大湾区的生态承载力总体稳定, 但由于消耗增加, 整体呈现生态赤字, 人均生态赤字达 3.09 hm²。未来大湾区土地利用规划中, 需加强自然资源保护, 合理调整土地结构, 实现经济和生态的可持续发展。

关键词: 粤港澳大湾区; 土地利用变化; 生态系统变化; 生态系统服务价值; 生态足迹; 生态承载力

Evolution of the ecosystem services value and carrying capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on land use changes

ZHANG Jie^{1, 2}, LI Qingquan¹, WU Xiangyin³, ZHANG Chenchen^{1, 2}, WANG Jingzhe¹, WU Guofeng^{1, 3, *}

1 Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area of Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518060, China

2 College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

3 College of architecture and urban planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: Analysis of the spatio-temporal evolution process and characteristics of the land-use changes (LUCC), ecosystem services value (ESV), and ecological carrying capacity (ECC) of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) is an important basis for optimizing ecosystem management and improving ecosystem quality. Currently, there are still few comprehensive analyses on the combination the LUCC, ESV, and ECC of the GBA. This study uses the high-resolution remote sensing data to study the land-use changes and features of the GBA from 1990 to 2015, estimates the ESV based on the equivalent factor method, and evaluates the ECC based on the ecological footprint method. The results showed that from 1990 to 2015, the area of built-up land in GBA increased from 4407.58 km² to 8912.31 km², while the areas of cropland, forest, wetland, and unused land decreased significantly. The area of the forest and cropland decreased 3.19%

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41890854, 41901248); 深圳市科技创新委员会基础研究学科布局项目 (JCYJ20180507182022554)

收稿日期: 2020-07-14; **网络出版日期:** 2021-07-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guofeng.wu@szu.edu.cn

and 17.23% respectively. The increase of built-up land mainly came from cropland, forest, and water body and 2000—2010 was the most obvious time period. With the dramatic land-use changes, the ESV of the GBA decreased from 6385.09 billion yuan in 1900 to 6183.89 billion yuan in 2015 (decreased by 3.15%). Water contributed the most to ESV and the ESV of food production and hydrological regulation were the highest. Wetland had the greatest loss of value, decreasing by -54.64%, followed by unused lands, which decreased by 45.03%. The regional ecological footprint (EF) of the GBA increased rapidly from 80.57 hm² in 1990 to 241.31 hm² in 2015. The consumption of fossil energy has the largest increase, from 9.21 hm² in 1990 to 44.13 hm² in 2015. The ECC of GBA is generally stable, but the overall ecological deficit is serious due to the increased consumption. In 2015, the regional ecological deficit reached 214.88 million hm² and the per capita ecological load reached 3.09 hm². With a 50% increase in population and nearly 15-fold increase in Gross Domestic Product (GDP) from 1990 to 2015, the EF per GDP showed a clear downward trend from 1.47 hm²/yuan to 0.28 hm²/yuan, which indicates that although the overall resource utilization of the GBA has gradually changed from extensive and consumptive to intensive and economical, the overall situation is still challenging. In the future land use planning of the GBA, it is necessary to strengthen the protection of natural resources and rational adjustment of land-use structure to realize the sustainable development of economy and ecology.

Key Words: Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area; land-use changes; ecosystem changes; ecosystem service value; ecological footprint; ecological carrying capacity

土地是城市经济、社会、文化活动的必要载体,土地利用是人类生存和发展不可缺少的活动^[1-2]。伴随着快速工业化和城镇化进程,土地利用结构与方式发生了剧烈变化,造成生态系统结构与功能变化,进而影响生态系统服务功能与承载力^[3-4]。因此,定量研究土地利用对区域生态系统系统的影响有利于优化土地利用方式,提升生态系统质量,为区域可持续发展提供参考。

生态系统服务指人类通过生态系统的结构、功能和过程直接或间接地得到的产品和服务^[5]。近年来,我国学者围绕生态系统服务研究取得了一系列丰硕成果。刘耀林等^[6]和欧阳志云等^[8]研究了生态系统服务功能、可持续发展及其生态学机制;傅伯杰等^[9]总结了生态系统服务评估方法的特点及相关背景和概念;胡和兵等^[10]定量探讨了城市化地区流域生态系统服务价值与土地利用程度间的时空分异关系。一系列研究讨论了滨海湿地^[11]、石漠化地区^[12]、水源涵养地^[13]、城市群^[14-15]等不同生态系统土地利用与生态服务价值之间的关系;刘亚茹等建立模型分析土地利用变化对生态服务系统的影响^[16],揭示城市化对生态服务价值的影响^[4]。然而,当前针对大湾区的研究主要关注的是大湾区建成区演变、生态系统格局^[17-18]及生态系统服务价值识别^[19]等特定内容,缺乏针对大湾区土地利用变化过程、生态系统服务价值、生态足迹及生态承载力演变结合的系统分析。

粤港澳大湾区(以下简称为大湾区)是全球第四大湾区,是中国经济最发达、开放程度最高、人口密度最大的城市群之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。本研究以粤港澳大湾区为研究区域,采用遥感数据研究大湾区 1990—2015 年土地利用变化和转移矩阵,分析其长时间序列的土地利用变化;在此基础上采用当量法分析其生态服务价值变化;基于生态足迹法分析大湾区的生态承载力变化,并评估其生态系统的生态盈余/赤字情况。研究结果可为粤港澳大湾区土地利用优化、土地资源合理利用和生态环境保护提供理论依据,为政府部门制定生态安全管控等相关政策、进一步协调经济发展与生态环境提供参考。

1 研究区概况

粤港澳大湾区是由广州、深圳、珠海、佛山、东莞、中山、惠州、江门、肇庆九市及香港、澳门两个特别行政区组成的城市群,地处珠江下游,总面积约 5.6 万 km²(图 1)。该区域属亚热带季风气候,多年平均降水量达 1800 mm,年平均日照量为 2000 h,年平均气温 21.4—22.4℃,自然资源丰富,具有重要的生态价值。粤港澳大

湾区是我国快速城市化最具代表性的区域之一,是我国建设世界级城市群和参与全球竞争的重要载体。根据《粤港澳大湾区发展规划纲要》要求^[20],未来大湾区将建设成为世界级城市群、宜居宜业宜游的优质生活圈和高质量发展的典范,这对大湾区的生态环境提出了更高的要求。

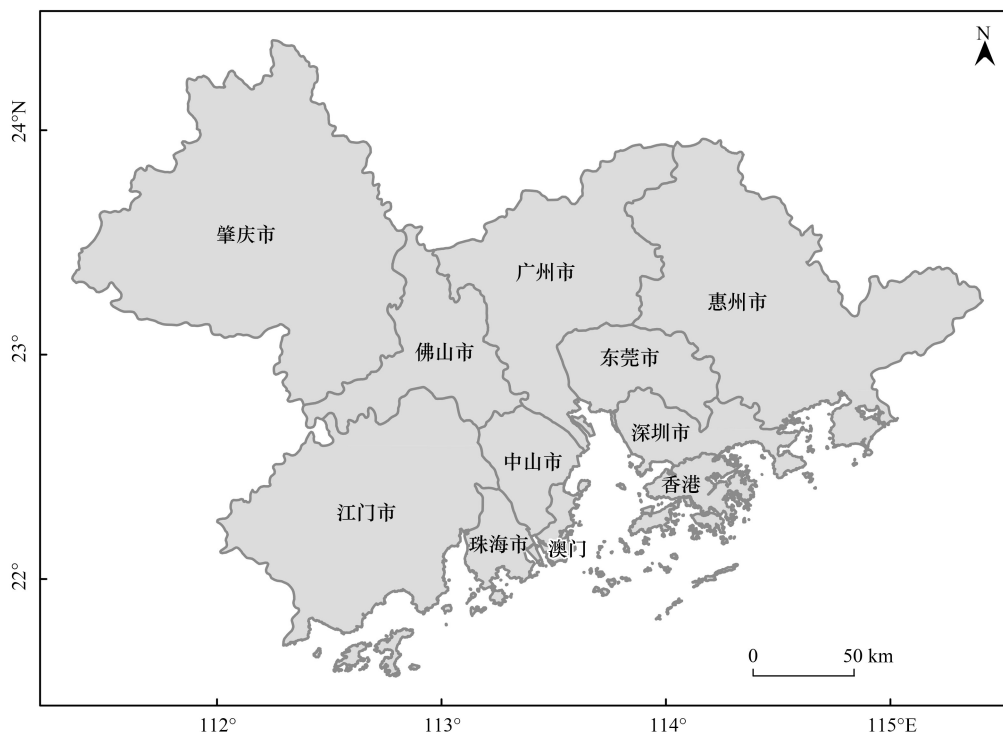


图1 粤港澳大湾区

Fig.1 Location of the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area (GBA)

2 数据源与研究方法

2.1 数据源

土地利用数据来源于清华大学最新的 30 m 逐年、高分辨率遥感影像数据集 (CLUD-A 数据集)^[21],选择 1990、2000、2010、2015 年 4 期大湾区土地利用数据。该数据融合了多套主流遥感数据,包括 6 个一级类及 25 个二级子类,分类精度达到 94.3%^[21],分类精度较好,符合本研究的需要。在本研究中,土地利用类型划分为耕地、草地、水域、林域、建设用地、湿地及未利用土地。

生态系统服务价值 (Ecosystem Services Value, ESV) 估算所需的单位面积粮食产量、农作物播种面积等数据来源于国家统计局、《中国统计年鉴》、《广东省统计年鉴》及粤港澳大湾区各市统计年鉴。生态足迹 (Ecological Footprint, EF) 计算所需的粮食消费量、蛋奶消费量、能源消费量、水产品消费量、人口等基础数据来自《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《广东省统计年鉴》及大湾区各市统计年鉴。全球各类农作物的平均产量数据来自联合国粮农组织数据库。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化分析

土地利用转移矩阵主要适用于定量研究土地利用类型间相互转化的数量及方向特征,能具体反映土地利用变化的结构特征和各类型之间的转化关系^[22],反映出在一定时间间隔下,从 T 时刻向 $T+1$ 时刻状态转化过程中的变化过程^[23],其数学表达式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, S_{ij} 表示研究期初与研究期末的土地利用状态, n 为土地利用的类型数。本文采用 ArcGIS 10.5 平台的叠置分析及统计功能获得研究区 1990—2000、2000—2010、2010—2015 年土地利用转移矩阵。基于土地利用转移矩阵对比分析不同时段大湾区土地利用的时空变化情况。

2.2.2 生态系统服务价值评估

(1) 生态系统服务价值系数修正

联合国发起的千年生态系统评估将生态系统服务归纳为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四类^[24]。谢高地等^[25]在 Costanza 的评价模型基础上,依据中国的实际情况提出了中国生态服务价值当量因子法^[25],其后依据调研资料和生物量时空分布数据对该方法进行 1 修订和补充。本文采用谢高地等^[26]提出的生态系统服务价值当量表进行核算,并采用徐丽芬等^[27]“以农田为基准的地区修正”方法对当量因子表进行研究区尺度修正(公式 2 和 3)。

$$\theta = \frac{Q}{Q_o} \quad (2)$$

$$E_i = \theta \times E_{io} \quad (3)$$

式中, θ 为研究区修订因子, Q 和 Q_o 分别为粤港澳大湾区和全国单位面积平均产量, E_i 表示 i 类土地利用类型修正后的当量因子, E_{io} 表示谢高地等确定的同类土地利用类型当量因子;其中, $i = 1, 2, \dots, 6$, 分别对应本研究中的耕地、林地、草地、湿地、未利用地及水域。

2015 年粤港澳大湾区和全国的耕地单位面积粮食产量分别为 $5.25\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $5.48\text{t}/\text{hm}^2$, 根据公式(2) 计算获得大湾区的生态服务当量修订因子为 0.96。由华南粮网(<https://gdgrain.com/>) 获得大湾区 2015 年末的粮食采购价格为 2939.7 元/t。由于自然生态系统提供的经济价值是现有单位面积耕地提供的食物生产服务经济价值的七分之一^[28], 因此, 计算可知大湾区一个生态服务价值量因子的经济价值为 $2204\text{元}/\text{hm}^2$, 进而得到大湾区不同生态系统单位面积的生态服务价值(表 1)。

表 1 1990—2015 年粤港澳大湾区不同生态系统单位面积的生态服务价值/(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 1 The ecosystem services value (ESV) of different ecosystems of Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area (GBA) during 1990—2015

第一类服务 First level services	第二类服务 Second level services	耕地 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	未利用地 Unused land	水域 Water body
供给服务 Provisioning service	食物生产	2877.54	1734.99	1481.09	1079.08	0.00	1692.67
	原料生产	190.43	3998.94	2179.32	1057.92	0.00	486.64
	水资源供给	-5564.66	2073.52	1206.03	5480.03	0.00	17540.31
调节服务 Regulating service	气体调节	2348.58	13160.52	7659.34	4020.10	42.32	1629.20
	气候调节	1206.03	39354.62	20248.59	7617.02	0.00	4845.27
	净化环境	359.69	11446.69	6686.05	7617.02	211.58	11742.91
	水文调节	5755.08	24522.59	14832.04	51266.80	63.48	216323.48
支持服务 Supporting service	土壤保持	21.16	16016.91	9330.85	4887.59	42.32	1967.73
	维持养分循环	402.01	1227.19	719.39	380.85	0.00	148.11
	生物多样性	444.33	14578.14	8484.52	16651.66	42.32	5395.39
文化服务 Cultural service	美学景观	190.43	6389.84	3745.04	10007.92	21.16	3998.94

最终计算得到研究区的生态系统服务价值:

$$ESV = \sum S_k \times VC_k \quad (4)$$

式中, ESV 表示生态系统服务价值(元), S_k 表示研究区第 k 类土地利用类型的面积(公顷), VC_k 表示生态系统类型 k 单位面积的生态系统服务价值系数(元/公顷)。

2.2.3 生态承载力评估

生态足迹法是以土地为媒介量化区域人类活动的生态资本需求及其可持续性的资源核算方法,包含生态足迹与生物承载力两个综合指标^[29]。生态足迹从消费角度核算人类消费行为的生态资本需求;生物承载力则衡量自然提供生态资本的能力^[30]。本研究基于粤港澳大湾区多年土地利用情况构建基于生态服务价值的均衡因子和产量因子,计算研究区的生态足迹和生态承载力。

(1) 生态足迹及生态承载力

生态足迹模型^[31-33]的计算如公式(5)所示:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{j=1}^n (a_j \times r_j) \quad (5)$$

生态承载力的计算如公式(6)所示:

$$EC = N \times ec = N \times \sum_{j=1}^n (a_j \times r_j \times y_j) \quad (6)$$

式中, EF 为区域总人口的生态足迹(hm^2), EC 为区域总人口的生态承载力(hm^2), N 为研究区域总人口, ef 为人均生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$), ec 为人均生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$), a_j 为人均生物生产面积, r_j 为均衡因子, y_j 为产量因子。

(2) 均衡因子及产量因子计算

均衡因子是指某一生态系统类型单位面积提供某种生态系统服务的能力与所有生态系统类型单位面积提供该种生态系统服务平均能力的比值^[32]。由于单位面积耕地、化石燃料土地、草地、林地等的生物生产能力差异很大,需使用均衡因子将每类生物生产面积转化为统一、可比较的生物生产面积^[33-34]。根据郭慧等^[32]的研究,均衡因子计算公式如下:

$$r_j = \frac{Z_j}{Z_{np}} = \frac{D_t \times S_j}{\left(\sum_0^n (D_t \times S_j \times H_j) \right) / \sum_0^n H_j} \quad (7)$$

式中, r_j 为均衡因子, Z_j 为 j 种生态系统类型单位面积的生态系统服务价值(元), $\overline{Z_{np}}$ 为所有用地类型的单位面积平均生态系统服务价值(元), D_t 表示第 t 年研究区内 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/ hm^2), S_j 表示研究区内第 j 类生态系统的生态系统服务价值当量因子之和, n 为研究区内提供生态系统服务的生态系统种类, H_j 表示第 j 类生态系统的面积(hm^2)。根据上文生态系统服务价值系数修正中介绍的计算方法,粤港澳大湾区的 D_t 值等于 2204 元/ hm^2 。

产量因子表征了区域某一类土地面积的生产能力与对应的整体平均水平的差异,主要用于对比不同区域之间生物生产性土地面积^[33]。本研究中产量因子取自 2015 年全球生态足迹网 (<https://www.footprintnetwork.org/>) 发布的《Working Guidebook to the National Footprint Accounts》^[35]。根据世界环境与发展委员会(WCED)的要求,在计算生态足迹的供给时扣除 12% 的生物多样性保护面积^[36-37]。

(3) 生态赤字(盈余)

使用生态赤字(盈余)对研究区域生态足迹与生物承载力进行比较,表征人地系统之间服务的供需情况和可持续发展程度。

$$S_y = EC_y - EF_y \quad (8)$$

式中, S_y 为生态赤字(盈余), y 代表研究年份, EC_y 代表第 y 年的研究区生物承载力, EF_y 代表第 y 年研究区的生态足迹; $S_y \geq 0$ 代表研究区处于生态赤字的状况,反之则为生态盈余状况。

(4) 化石能源生态足迹计算

化石能源消费主要包括煤、焦炭、燃料油、原油、汽油、煤油、柴油、液化石油气、天然气和电力。粤港澳大湾区 1990、2000、2010、2015 年的化石能源的消费量数据来自大湾区内各个市的统计年鉴。根据全球单位化石燃料生产土地面积的平均发热量,将当地能源消费所消耗的热量折算成一定的化石燃料土地面积^[38]。根据生态足迹计算模型,得到化石能源用地生态足迹。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

1990 年大湾区土地利用类型以林地为主(55.77%),其次为耕地(27.36%)。2015 年大湾区虽然仍以林地为主要类型,但比例缩小(53.99%),建设用地急剧增加(占 13.73%)。耕地主要分布在江门、肇庆、惠州,建设用地主要集中在广州、深圳、香港、澳门。1990—2015 年,大湾区的建设用地、水域面积增加,而耕地、林地、湿地及未利用地面积减少(图 2)。建设用地增幅最大,研究期内变化率为 102.20%,累计面积增加量约为 4504.73 km²,其次为水域,变化率为 0.94%。湿地、未利用地和耕地面积减少最大,分别减少 54.64%、45.03%和 17.23%。2010—2015 年草地面积增加,其余时段减少约 249.61 km²。耕地、林地和未利用地面积一直减少,耕地和林地面积减少约 4214.32 km²。随着耕地、林地等地类在大湾区土地总量中占比持续下降,建设用地面积由 6.79%增加到 13.73%(表 2)。

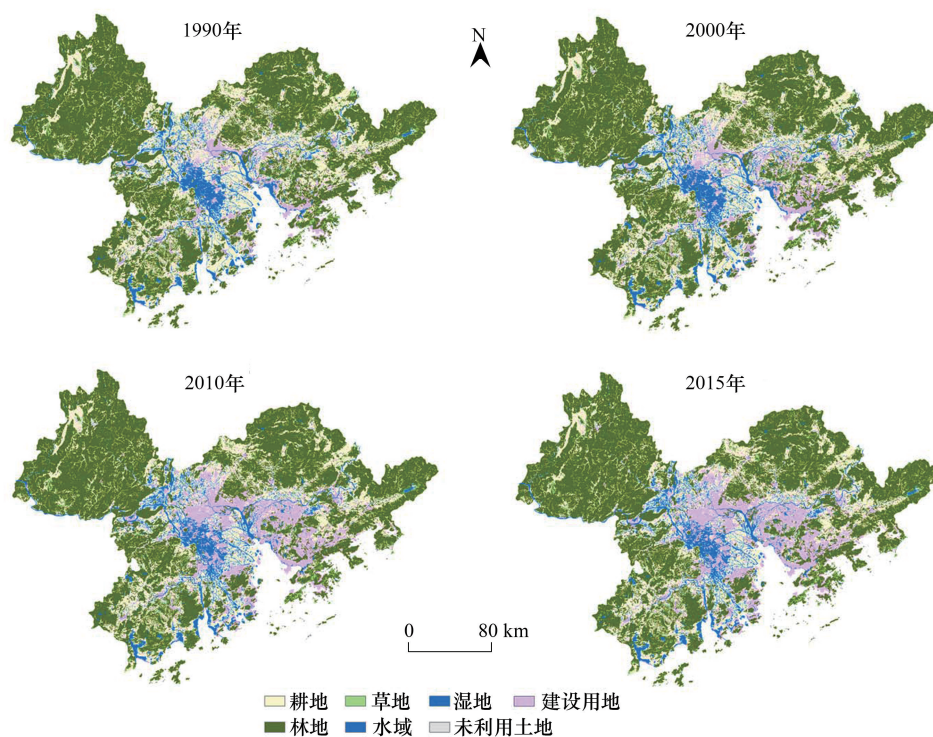


图 2 粤港澳大湾区 1990 至 2015 年土地利用

Fig.2 The land use changes of the GBA from 1990 to 2015

由表 3 可知,建设用地增加的主要来源为耕地、林地和水域;流失的耕地主要转化为建设用地、水域等;水域主要转化为建设用地,其余转为湿地、耕地等。其他土地利用类型也有不同程度转换,2000—2010 年,大约 1480.70 km² 的耕地用于城市建设;除湿地外,其他各类型土地转换到建设用地在 3 个时段内均最高,其中水域转换面积约 428.37 km²。

表 2 1990 至 2015 年粤港澳大湾区土地利用变化

Table 2 The area changes of different land use types of the GBA from 1990 to 2015

年份 Year	土地利用类型 Land use types	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	湿地 Wetland	水域 Water body	未利用土地 Unused land
1990	面积/km ²	17763.03	36212.81	1563.53	4407.58	426.82	4520.46	35.93
2000	面积/km ²	16993.98	36049.30	1448.62	5278.03	194.70	4937.82	27.73
2010	面积/km ²	14927.62	35405.63	1313.92	8382.49	191.49	4687.86	21.16
2015	面积/km ²	14702.66	35058.86	1480.17	8912.31	193.60	4562.82	19.75
1990—2000	面积变化量/km ²	-769.05	-163.51	-114.91	870.45	-232.12	417.37	-8.21
	变化率/%	-4.33	-0.45	-7.35	19.75	-54.38	9.23	-22.84
2000—2010	面积变化量/km ²	-2066.35	-643.67	-134.70	3104.46	-3.21	-249.96	-6.57
	变化率/%	-12.16	-1.79	-9.30	58.82	-1.65	-5.06	-23.69
2010—2015	面积变化量/km ²	-224.96	-346.77	166.25	529.82	2.11	-125.04	-1.40
	变化率/%	-1.51	-0.98	12.65	6.32	1.10	-2.67	-6.63
1990—2015	面积变化量/km ²	-3060.37	-1153.95	-83.37	4504.73	-233.22	42.36	-16.18
	变化率/%	-17.23	-3.19	-5.33	102.20	-54.64	0.94	-45.03

表 3 1990—2015 年粤港澳大湾区土地利用转移矩阵/km²

Table 3 The land use transfer matrix of GBA during 1990—2015

土地利用类型 Land use types	草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built-up land	林地 Forest	湿地 Wetland	水域 Water body	未利用土地 Unused land
草地 Grassland	1104.03	0.52	93.68	131.11	0.53	1.30	0.00
耕地 Cropland	1.56	12427.46	2147.30	88.58	4.85	448.44	0.05
建设用地 Built-up land	0.11	2.82	3734.04	10.39	0.84	5.98	0.01
林地 Forest	148.83	33.32	1015.18	29544.74	2.00	28.96	0.25
湿地 Wetland	2.00	38.56	77.27	6.28	135.76	104.65	0.25
水域 Water body	3.28	9.33	511.37	9.32	19.36	3297.41	0.23
未利用土地 Unused land	0.01	0.23	11.24	0.72	1.73	0.66	16.02

3.3 生态系统服务价值变化特征

3.3.1 各土地利用类型生态系统服务价值变化总体特征

由表 4 可知,大湾区的 ESV 在 1990、2000、2010、2015 年分别为 6385.09、6433.34、6252.65、6183.89 亿元,总体减少 201 亿元(3.15%)。2000—2010 年减少最大,减少了 2.81%。从各生态系统类型的 ESV 来看,森林价值所占比例最高,其次为水域。湿地生态系统的价值损失最大,26 年间减少了 25.67 亿元(-54.64%);其次为未利用地,减少了 45.03%。

3.3.2 各项生态系统服务的价值变化总体特征

由表 5 可知,1990 至 2015 年,除水资源供给功能外,大湾区的各项 ESV 均有所降低。其中食物生产功能下降最多,下降 8.93%;其次为维持养分循环功能,下降 5.21%;水文调节功能的 ESV 变化最小。在生态系统服务构成方面,气候调节、水文调节和土壤保持是最重要的生态系统服务功能,三者占各时期所有功能的 10%以上,综合价值超过总功能的 50%。其中,水文调节占最多(31%),而维持养分循环功能的占比最低(不足 1%)。图 3 显示 2015 年各土地利用类型的各项 ESV,每个图从内到外分别表示水域、未利用地、湿地、草地、林地、耕地六种土地利用类型的不同 ESV。其中森林的气候调节功能、水域的水文调节功能和森林的水文调节功能的价值总量最高,分别为 1379.93、987.05、859.73 亿元。未利用地的各项 ESV 都较低,湿地由于整体面积较小,虽然单位面积的 ESV 很高,但价值总量较低。

表 4 1990—2015 年粤港澳大湾区生态系统服务价值变化

Table 4 ESV changes of GBA during 1990—2015

土地利用类型 Land use types	生态系统服务价值/($\times 10^8$ 元) ESV				变化率/% Changing rate			
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2015 年	1990—2015 年
耕地 Cropland	146.20 (2.29%)	139.87 (2.17%)	122.86 (1.96%)	121.01 (1.96%)	-4.33	-12.16	-1.51	-17.23
森林 Forest	4870.77 (76.28%)	4848.77 (75.37%)	4762.20 (76.16%)	4715.56 (76.26%)	-0.45	-1.79	-0.98	-3.19
草地 Grassland	119.72 (1.88%)	110.92 (1.72%)	100.61 (1.61%)	113.34 (1.83%)	-7.53	-9.30	12.65	-5.33
湿地 Wetland	46.98 (0.74%)	21.43 (0.33%)	21.08 (0.34%)	21.31 (0.34%)	-54.38	-1.65	1.1	-54.64
未利用土地 Unused land	0.02 (0.00%)	0.01 (0.00%)	0.01 (0.00%)	0.01 (0.00%)	-22.84	-23.69	-6.63	-45.03
水域 Water body	1201.41 (18.82%)	1312.33 (20.40%)	1245.90 (19.93%)	1212.66 (19.61%)	9.23	-5.06	-2.67	0.94
总价值 Total	6385.09	6433.34	6252.65	6183.89	0.76	-2.81	1.10	-3.15

括号中百分数表示该项 ESV 占当年总 ESV 的比例

表 5 1990—2015 年粤港澳大湾区各项生态系统服务价值变化

Table 5 The value of every ecosystem service of the GBA during 1990—2015

生态系统服务 Ecosystem service	生态系统服务价值/($\times 10^8$ 元) ESV				价值占比/% Proportion				价值变化率/% Changing rate
	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	1990—2015 年
食物生产 Food production	124.37	122.16	114.47	113.26	1.95	1.90	1.83	1.83	-8.93
原料生产 Raw materials	154.25	153.16	149.77	148.65	2.42	2.38	2.40	2.40	-3.63
水资源供给 Water supply	59.76	69.61	75.21	73.76	0.94	1.08	1.20	1.19	23.43
气体调节 Gas regulation	539.36	534.26	519.49	515.47	8.45	8.30	8.31	8.34	-4.43
气候调节 Climate regulation	1503.38	1493.94	1462.16	1451.01	23.55	23.22	23.38	23.46	-3.48
净化环境 Waste treatment	487.70	487.92	475.94	471.55	7.64	7.58	7.61	7.63	-3.31
水文调节 Hydrological regulation	2013.22	2081.46	1997.55	1963.27	31.53	32.35	31.95	31.75	-2.48
土壤保持 Soil conservation	605.96	601.94	589.03	585.58	9.49	9.36	9.43	9.47	-3.36
维持养分循环 Maintain nutrient cycle	53.54	52.92	51.16	50.75	0.84	0.82	0.82	0.82	-5.21
生物多样性 Biodiversity conservation	580.57	575.26	562.41	58.03	9.09	8.94	8.99	9.02	-3.88
美学景观 Entertainment	262.98	260.71	254.66	252.55	4.12	4.05	4.07	4.08	-3.15

3.3 生态足迹与生态承载力变化特征

3.3.1 生态足迹分析

由表 6 可知,大湾区的区域生态足迹快速增长,由 1990 年的 80.57 hm^2 增长至 2015 年的 241.31 hm^2 ,增长了 2 倍,人均生态足迹由 $3.22 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加至 $3.47 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。化石能源的消耗增加最多,由 1990 年的 9.21 hm^2 增加至 2015 年的 44.13 hm^2 ,增长了近 4 倍;其次为水域,增长了近 3 倍(122.04 hm^2)。时间上,1990 年到 2000 年的区域生态足迹增长较快。生物资源账户占比从 1990 年的 88.57% 逐步降低至 2015 年的 80.91%,相应时间,其他资源账户占比从 11.43% 增加至 19.09% (表 6)。

3.3.2 生态承载力与生态盈亏分析

由表 7 可知,1990—2015 年大湾区整体处于生态赤字状态,生态足迹远大于生态承载力,且生态负荷不断增加,人均生态负荷也逐渐增加。2015 年区域生态负荷达到 21488 万 hm^2 ,人均生态负荷达到 3.09 hm^2 ,表明大湾区的自然资源已经过度利用,有必要在不降低人们生活水平的前提下降低生态足迹的需求。

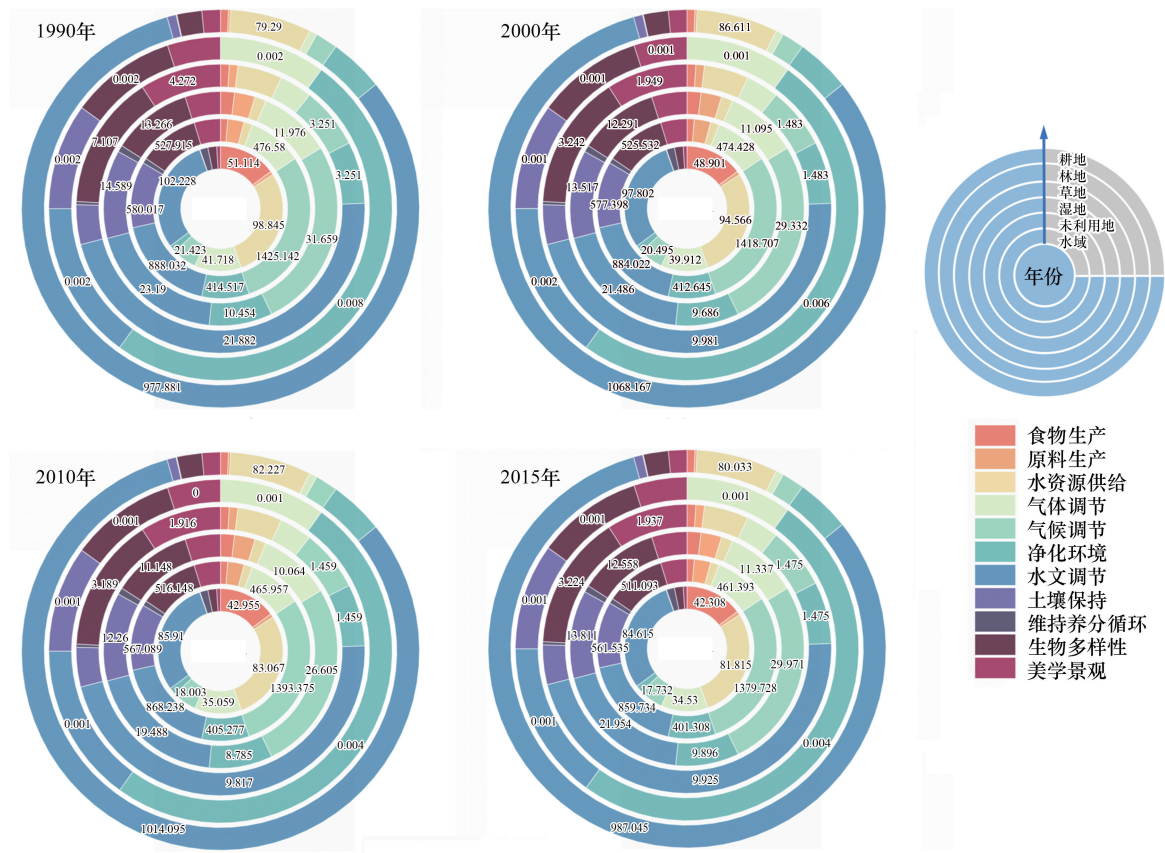


图 3 粤港澳大湾区各土地利用类型的各项生态系统服务价值/($\times 10^8$ 元)

Fig.3 The Ecosystem Service Value of different land use types of the study area

表 6 粤港澳大湾区生态足迹变化

Table 6 The changes of ecological footprints of GBA

账户 Accounts	项目 Item	1990 年		2000 年		2010 年		2015 年	
		区域 EF/ ($\times 10^6 \text{hm}^2$)	人均 EF/ ($\text{hm}^2/\text{人}$)	区域 EF/ ($\times 10^6 \text{hm}^2$)	人均 EF/ ($\text{hm}^2/\text{人}$)	区域 EF/ ($\times 10^6 \text{hm}^2$)	人均 EF/ ($\text{hm}^2/\text{人}$)	区域 EF/ ($\times 10^6 \text{hm}^2$)	人均 EF/ ($\text{hm}^2/\text{人}$)
生物资源账户 Biological resources account	耕地	1.22	0.05	0.82	0.02	1.07	0.02	1.53	0.02
	草地	11.06	0.44	23.13	0.46	19.78	0.31	17.31	0.25
	水域	47.16	1.88	117.08	2.34	143.68	2.25	169.20	2.43
	林地	11.92	0.48	12.00	0.24	12.15	0.19	7.20	0.10
其他资源账户 Other resources account	化石能源用地	9.21	0.37	21.26	0.43	37.32	0.59	44.13	0.63
	建设用地	0.00	0.00	0.45	0.01	1.35	0.02	1.93	0.03
合计 Total		80.57	3.22	174.74	3.49	215.35	3.38	241.31	3.47

EF:生态足迹 Ecological footprint

4 讨论与结论

4.1 讨论

1990—2015 年粤港澳大湾区的建设用地明显增加,耕地、林地、草地、湿地和未利用地明显减少。同时,大湾区生态系统服务价值总体减少约 201.20 亿元,生态环境明显退化。区域总生态足迹呈增长趋势,人均生态足迹略有上升,生态赤字不断增加。结合大湾区的长时间序列人口、GDP 等社会经济数据分析(图 4),1990—2015 年,大湾区人口和 GDP 大幅增长,常住人口增长 50%,GDP 增长近 15 倍,单位 GDP 生态足迹从

1.47 hm²/元降低到 0.28 hm²/元,呈明显的下降趋势。这在一定程度上说明大湾区总体上发展的资源利用方式逐步由粗放型、消耗型转变为集约型、节约型,但整体仍面临严峻的生态状况。Zhang 等^[39]研究发现,大湾区城市扩张的驱动力主要包括 GDP、人口、地方财政收入及道路长度。随着时间推移,社会经济驱动力的贡献增加,物理驱动力的贡献下降,不同驱动力间存在相互增强的关系。王文静等^[17]的研究表明,土地城市化和人口城市化是大湾区生态系统变化的重要原因:土地城市化使大量具有高生态价值的自然生态系统转化为城镇生态系统;而人口城市化快速发展,不仅使城市内部配套基础设施面积快速增长,还使一些原有自然生态系统(如桑基鱼塘)疏于管理,出现废弃和富营养化的情况^[40]。

表 7 粤港澳大湾区生态承载力及生态盈亏分析
Table 7 The ecological carrying capacity and ecological balance of GBA

土地利用类型 Land use types	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年
耕地 Cropland	0.02	0.01	0.01	0.01
草地 Grassland/(hm ² /人)	0.01	0.01	0.00	0.00
水域 Waterbody/(hm ² /人)	0.07	0.04	0.03	0.03
林地 Forest/(hm ² /人)	0.87	0.43	0.33	0.30
化石能源用地 Fossil energy land/(hm ² /人)	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地 Built-up land/(hm ² /人)	0.06	0.04	0.04	0.04
总计 Sum/(hm ² /人)	1.03	0.52	0.42	0.38
区域生态盈亏 Ecological deficit/(×10 ⁶ hm ²)	-54.84	-148.71	-188.87	-214.88
人均生态负荷 Ecological deficit per person/(hm ² /人)	-2.19	-2.97	-2.96	-3.09

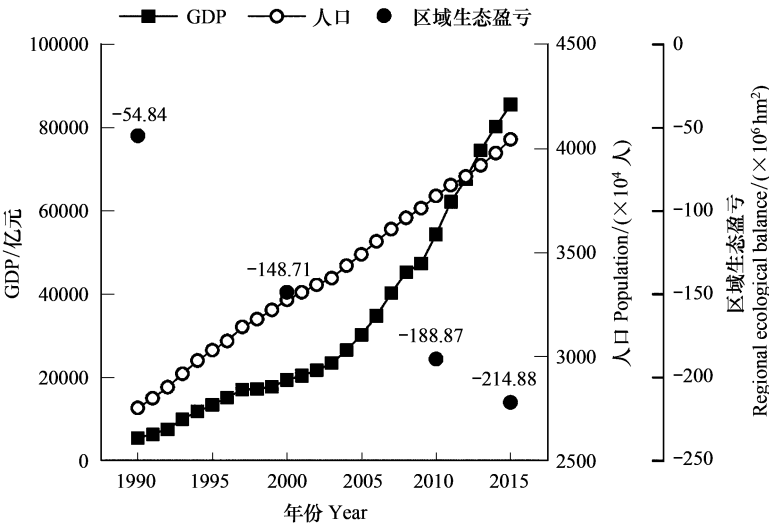


图 4 粤港澳大湾区生态盈亏与 GDP 和人口间的关系
Fig.4 The relationship between the ecological balance and GDP and population in GBA

当前,大湾区面临严重的生态透支问题,包括土地、能源、水等生态资源质量下降,资源环境约束加剧^[17]。同时,随着生活水平的提高,公众对清洁的空气、水、绿化空间等生态环境的需求日益增长。2018 年,《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确表示“大湾区发展空间面临瓶颈制约,资源约束趋紧,生态环境压力日益增大”,提出要“大力推进生态文明建设,推动形成绿色低碳的生产生活方式和城市建设运营模式,促进大湾区可持续发展”^[20]。构建生态湾区、绿色湾区,实现湾区可持续发展,是大湾区发展的重要目标。因此,在供给端要提供必需的生态系统服务,而在消费端则要抑制不合理的生态足迹增长。同时,要严格保护具有生态价值的自然山地、绿地、海岸、湿地及基本农田,注重土地利用和景观格局优化,促进形成安全可靠的生态系统和覆盖全

域的生态安全支撑体系,最终实现绿色低碳、可持续发展的“生态湾区”。最后,作为特大城市群,大湾区内各城市间的生态命运息息相关,需要在统一的生态规划下,依照生态红线、规划及生态格局,创新协调,实现各城市的绿色协同,共同发展,最终打造世界可持续发展城市群的典范,推动可持续发展转型。

本研究基于当量法对大湾区的生态系统服务价值进行研究,虽然这种方法能够快速有效地核算区域ESV,但这种方法对于土地利用分类系统依赖性较强。因此,未来可考虑大湾区的实际情况,对生态系统分类进行细化,增加红树林、沙滩、盐沼等海岸带特殊生态系统。此外,基于InVEST^[41]、ARIES^[42]、SolVES^[43]等物质量模型开展的研究也日渐兴起,为生态系统价值评估研究提供了新的技术手段。鉴于此,未来研究可进一步结合高精度遥感数据、物质量模型和城市扩张模型,充分发挥各类方法的优势,探索气候变化与土地利用变化对生态系统服务的影响,探讨二者之间的权衡协同响应机理。

4.2 结论

本研究结合粤港澳大湾区实际情况,研究了粤港澳大湾区近三十年来的土地利用变化,估算大湾区生态系统服务价值,探讨了研究区的生态足迹、生态承载力及生态盈亏,主要结论如下:

(1)1990—2015年粤港澳大湾区经历了快速城市化过程,土地利用变化明显。大量森林和耕地转化为城市建设用地,建设用地面积增加了1倍,而林地和耕地面积分别减少了3.19%和17.23%,这一变化趋势在2000—2010年尤为显著。

(2)粤港澳大湾区的生态系统服务呈现下降趋势。由于城市扩张,建设用地挤占了大量自然、半自然生态系统的面积,导致大湾区生态系统服务总价值减少201亿元,湿地的生态系统价值减少最多。食物生产和维持养分循环功能的价值显著降低,快速城市化带来的生态系统价值减少问题,需要引起重视。

(3)大湾区生态足迹和生态承载力的变化状况表明,大湾区人均生态足迹呈增加趋势,2015年,生态赤字达到21488万 hm^2 ,生态严重超载,可持续、绿色发展是关系大湾区未来长远发展的重要议题。

(4)聚焦大湾区未来发展,需要严格落实耕地保护红线和生态保护红线,合理控制城市生态系统规模;同时可针对不同发展阶段的城市制定差异化策略;并通过增加绿地面积、改善绿地质量、优化土地利用和景观格局等方式提高区域生态系统服务,助力粤港澳大湾区生态环境高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 朱天明,杨桂山,万荣荣.城市土地集约利用国内外研究进展.经济地理,2009,29(6):977-983.
- [2] 叶延琼,章家恩.广州市土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究.生态科学,2008,27(2):119-123.
- [3] Gascoigne W R, Hoag D, Koontz L, Tangen B A, Shaffer T L, Gleason R A. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA. Ecological Economics, 2011, 70(10):1715-1725.
- [4] 许译方,周永杰,何煜然,邝红艳,杨大勇.基于土地利用变化的粤港澳大湾区生态系统服务价值预测研究.生态科学,2020,39(1):207-212.
- [5] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26:152-158.
- [6] 刘耀林,郝弘睿,谢婉婷,王保顺.基于生态系统服务价值的土地利用空间优化.地理与地理信息科学,2019,35(1):69-74.
- [7] 欧阳志云,郑华.生态系统服务的生态学机制研究进展.生态学报,2009,29(11):6183-6188.
- [8] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价.应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [9] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展.地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [10] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,安静.城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.生态学报,2013,33(8):2565-2576.
- [11] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,赵文祯.近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系.生态学报,2020,40(8):2555-2566.
- [12] 顾剑红,王玉杰,王云琦,张会兰,马超.土地利用变化对生态服务价值的影响——以广西隆林县和西林县为例.中国水土保持科学,2016,14(5):100-109.
- [13] 罗维,易海杰,李红举,贾文涛,冯兆忠.洋河流域土地利用时空变异及其对生态服务功能价值的影响.生态学报,2017,37(16):

- 5342-5351.
- [14] 肖红克, 李洪忠, 王莉, 陈劲松, 韩宇. 粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化——以广佛肇为例. 水土保持研究, 2020, 27(1): 290-297.
- [15] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [16] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [17] 王文静, 韩宝龙, 郑华, 欧阳志云. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟. 生态学报, 2020, 40(10): 3364-3374.
- [18] 周永杰, 易灵, 邝红艳, 何煜然, 杨大勇, 周丽旋. 粤港澳大湾区生态系统演变及其服务价值研究. 环境保护, 2019, 47(23): 56-60.
- [19] 李婧贤, 王钧. 粤港澳大湾区生态系统服务识别、分类及制图. 生态学报, 2019, 39(17): 6393-6403.
- [20] 中共中央国务院. 粤港澳大湾区发展规划纲要. (2019-02-18) [2021-01-22]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5370836.htm.
- [21] Xu Y D, Yu L, Peng D L, Zhao J Y, Cheng Y Q, Liu X X, Li W, Meng R, Xu X L, Gong P. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980-2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm. Science China Earth Sciences, 2020, 63(9): 1390-1407.
- [22] 任斐鹏, 江源, 熊兴, 董满宇, 王博. 东江流域近 20 年土地利用变化的时空差异特征分析. 资源科学, 2011, 33(1): 143-152.
- [23] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [24] 高艳妮, 张林波, 李凯, 李付杰, 李岱青, 虞慧怡, 贾振宇. 生态系统价值核算指标体系研究. 环境科学研究, 2019, 32(1): 58-65.
- [25] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [26] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [27] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [28] 肖玉, 谢高地, 安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能经济价值变化研究. 应用生态学报, 2003, 14(5): 676-680.
- [29] 世界自然基金会. 2005 亚太区生态足迹与自然财富. 世界环境, 2006, 04: 58-70.
- [30] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630-636.
- [31] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby H R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. Ecological Economics, 1998, 27(2): 149-160.
- [32] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 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.
- [33] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1550-1559.
- [34] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 399-410.
- [35] Lazarus E, Zokai G, Borucke M, Panda D, Iha K, Morales J C, Wackernagel M, Galli A, Gupta N. Working Guidebook to the National Footprint Accounts 2014. https://www.footprintnetwork.org/content/images/article_uploads/NFA%202014%20Guidebook%207-14-14.pdf
- [36] Rees W E, Wackernagel M, Testemale P. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Philadelphia: New Society Publishers, 1996.
- [37] World Commission on Environment and Development (WCED). Our Common Future. London: Oxford University Press, 1987: 1-91.
- [38] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析——以广州为例. 地理研究, 2003, 22(5): 654-662.
- [39] Zhang J, Yu L, Li X C, Zhang C C, Shi T Z, Wu X Y, Yang C, Gao W X, Li Q Q, Wu G F. Exploring annual urban expansions in the Guangdong-Hong Kong-Macau greater bay area: spatiotemporal features and driving factors in 1986-2017. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2615.
- [40] 刘通, 程炯, 苏少青, 郭月婷, 陈旭飞, 徐秋婷. 珠江三角洲桑基鱼塘现状与创新研究. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1814-1820.
- [41] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轶, 李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.
- [42] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [43] 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于 SolVES 模型的生态系统文化服务价值评估——以浙江省武义县南部生态公园为例. 生态学报, 2018, 38(10): 3682-3691.