

DOI: 10.5846/stxb202003310765

温宥越, 孙强, 燕玉超, 肖敏志, 宋巍巍, 杨剑. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8482–8493.

Wen Y Y, Sun Q, Yan Y C, Xiao M Z, Song W W, Yang J. Impacts of the terrestrial ecosystem changes on the carbon fixation and oxygen release services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8482–8493.

粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响

温宥越^{1,2}, 孙强^{1,2}, 燕玉超³, 肖敏志^{1,2}, 宋巍巍^{1,2}, 杨剑^{1,2,*}

1 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510535

2 国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 广州 510535

3 北京大学, 北京 100084

摘要: 基于 CASA 模型、碳税法 and 工业制氧法, 测算了粤港澳大湾区 2015 年固碳释氧量及其价值, 并结合 ESA CCI-LC 产品探讨了 2000—2015 年研究区陆地生态系统演变及其导致的固碳释氧量和价值的变化。结果表明: (1) 2000—2015 年, 研究区城市扩张明显, 主要表现为城镇用地侵占农田和草地。(2) 研究区陆地生态系统 91.03% 固碳释氧量及其价值集中在森林和农田生态系统, 2000—2015 年陆地生态系统演变造成区域内固碳量和释氧量分别减少了 53.49 G g 和 518.65 G g, 对应固碳释氧价值损失量分别为 1.79 亿元和 2.06 亿元, 合计 3.85 亿元, 91.57% 损失量是由城市扩张导致的。(3) 城市覆盖面积与固碳释氧价值呈现强负相关, 其扩张会促使生态系统固碳释氧价值逐渐减少, 林地覆盖面积与固碳释氧价值呈现强正相关, 其比重增加将有利于生态系统固碳释氧价值的培育。本文利用“邻域代理法”获得了研究区多类陆地生态系统演变情况及其对固碳释氧服务的影响, 具有一定的推广价值。在未来发展过程中, 粤港澳大湾区应该优化陆地生态系统类型, 合理控制城市扩张, 保护森林和农田资源, 减少人类活动作用, 增强生态系统自然演变过程。

关键词: 粤港澳大湾区; 生态系统演变; 固碳; 释氧; 邻域代理法; 植被 NPP

Impacts of the terrestrial ecosystem changes on the carbon fixation and oxygen release services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

WEN Youyue^{1,2}, SUN Qiang^{1,2}, YAN Yuchao³, XIAO Minzhi^{1,2}, SONG Weiwei^{1,2}, YANG Jian^{1,2,*}

1 South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China

2 National Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, Guangzhou 510535, China

3 Peking University, Beijing 100084, China

Abstract: In this study, we used the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model, carbon and industrial oxygen production methods to calculate the carbon sequestration oxygen release amount and its value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) in 2015, and combined with European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative Land Cover (CCI-LC) products, we discussed the evolution of the terrestrial ecosystem in the study area from 2000 to 2015 and the changes in carbon sequestration oxygen release and its value. The findings suggest the following: (1) During 2000—2015, the urban expansion of the study area was obvious, mainly manifested as the encroachment of urban land on farmland and grassland. (2) 91.03% of the total amount and value of carbon fixation and oxygen release were provided by the forest and farmland in the GBA. The terrestrial ecosystem changes in the GBA during 2000—2015 had brought about

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (No. PM-zx703-202002-054)

收稿日期: 2020-03-31; 修订日期: 2020-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjian@scies.org

losses of 53.49 G g in carbon fixation and 518.65 G g in oxygen release, respectively, and the corresponding values decreased by 179 million yuan and 206 million yuan, respectively, of which 91.75% of these losses were caused by urban encroachment on other land use types. (3) The carbon fixation and oxygen release values have a strong negative correlation with urban coverage, which means that urban expansion can significantly reduce the carbon fixation and oxygen release values. On the contrary, there is a strong positive correlation between the value of carbon fixation and oxygen release and the forest coverage, and the increase in forest coverage is beneficial to the increases in the carbon fixation and oxygen release values. In this paper, the "neighborhood proxy method" was used to obtain the variations in the amount of carbon fixation and oxygen release and the values thereof caused by the terrestrial ecosystem changes, which was worth of widely use. Looking ahead, the government of the GBA is highly recommended to optimize the structure of terrestrial ecosystems by controlling urban expansion, protecting forest resources and reducing the artificial role but enhancing the natural role in the ecosystem changes, so as to achieve green sustainable development.

Key Words: GBA; terrestrial ecosystem change; carbon fixation; oxygen release; neighborhood proxy method; net primary productivity

陆地生态系统所提供的固碳释氧服务是人类生存与现代文明得以维系和发展的基础^[1-2],它是指陆地生态系统中的绿色植被通过光合作用吸收空气中的 CO₂,生成葡萄糖等有机物质并释放出 O₂的过程,它属于陆地生态系统的气体调节服务功能,在改善全球生态环境和维持气候平衡过程中发挥着不可替代的作用^[1,3]。随着工业化进程的不断深入,CO₂等温室气体人为排放量剧增导致全球气候显著变暖,如何降低大气 CO₂浓度,从而减缓全球气候变暖进程成为国内外研究焦点。目前,我国正处于工业化和城市化加速发展阶段,经济快速增长势必带来高能源消耗及对应 CO₂排放量增加,在这背景下对陆地生态系统的固碳释氧服务进行评估,并加强其作为减缓全球变暖的重点是非常必要的。

近年来,国内外不少学者就陆地生态系统的固碳释氧服务做了大量的研究,例如,学者对固碳释氧服务的获取方法进行了充分的应用和对比^[1-2,4-6],应用这些方法学者深入研究了特定区域陆地生态系统固碳释氧服务的时空特性及其影响因素^[5,7-9],并对特定类型生态系统的固碳释氧服务及其变化进行了分析,如森林^[4,10-11]、草地^[11-12]、农田^[13]和湿地^[11,14]等。此外,也有研究探讨了如何提高陆地生态系统的固碳释氧服务,如 Ducat D.C 总结提出合成生物学及改良固碳的加爾文循环途径可根本上提高作物固碳效率^[15],Bar-Even A 发现重新调整植被中央代谢过程可增强其固碳能力^[16],当然,适当的人为干预也是有效的途径,例如,植树造林^[17]、退耕还林^[18-19]、林分结构的改善^[20-21]等。此外,随着遥感技术的日益精进,近年来有越来越多的研究利用遥感手段来辅助估计区域陆地生态系统的固碳释氧服务^[5-9,11],该方法通常是通过遥感数据估算植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP),然后根据光合作用方程式和生态系统服务与市场价值体系之间的关系计算固碳释氧服务^[5-9,11]。

已有不少研究利用遥感的方法获得了陆地生态系统类型演变对固碳释氧服务的影响作用^[5-6,12],这些研究通常利用不同年份的遥感和气象数据,结合植被 NPP 反演模型获得陆地生态系统类型演变前后的植被 NPP 结果及差异,并最终获得固碳释氧固碳释氧服务变化。但由于外界环境条件不一致,通过对比不同年份的数据而获得的固碳释氧服务差异,实际上是综合了所有影响因素(如气候变化、人类活动、生态系统类型转变等)变化后的差异^[22],因此,如何有效地获得陆地生态系统类型演变对固碳释氧服务的影响作用仍是一个需要解决的问题。Imhoff 等^[23]提出“邻域代理法”通过搜寻某城市扩张象元周围一定范围的非城市象元的植被 NPP 均值用以代表该城市扩张象元城市扩张前的植被 NPP,从而获得了美国 1992—1993 年城市扩张前后植被 NPP 的变化情况,该方法的有效性得到不少研究的进一步验证^[22,24]。但这些研究只是将“邻域代理法”运用在城市扩张这一特殊的陆地生态系统类型演变类型中,有必要将其拓展到多类陆地生态系统类型演变中,从而有效地获得陆地生态系统类型演变对固碳释氧服务的影响作用。

粤港澳大湾区(以下简称大湾区,Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,GBA)是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。近年来,受气候变化及人类活动的影响,大湾区陆地生态系统持续受到频繁洪涝灾害、台风等极端天气的重要影响^[25]。研究表明,2000年以来大湾区的主体——珠三角地区在城市化的影响下,陆地生态系统环境质量加速下降,陆地生态系统一直处于脆弱型^[26],而且2007年以来大湾区极高、高生态敏感区比重增加了1.32%^[27]。至21世纪末,大湾区的平均气温将上升2.0℃^[28],而在政策影响下大湾区的发展无疑将更加快速,因此,未来大湾区的陆地生态系统将面临深入且复杂的变化,这将给其所提供的固碳释氧服务带来更加严峻的考验。但目前,关于大湾区陆地生态系统固碳释氧服务的研究还相对较少,迫切需要通过定量的方法科学准确地评价研究区的固碳释氧服务,并揭示不同陆地生态系统演变影响固碳释氧服务的规律和机制。因此,本文基于CASA模型、碳税法和工业制氧法分别估算了粤港澳大湾区2015年的植被NPP、固碳释氧量及其价值,并运用ESA CCI-LC产品探究了2000—2015年间该区域陆地生态系统演变及其对固碳释氧量和价值的影响。本研究旨在为当地政府建设美丽湾区,增强生态系统稳定性及安全性,提升生态环境质量,促进社会经济持续健康发展等提供科学依据和决策支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

大湾区由我国香港、澳门两个特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市(珠三角九市)组成,范围为21°34'2"—24°23'32"N、111°21'24"—115°25'18"E,是继美国纽约湾区、旧金山湾区、日本东京湾区之后的世界第四大湾区。大湾区是由珠江水系的西江、北江、东江及其支流潭江、绥江、增江携带泥沙沉积形成的复合型三角洲平原,濒临南海,大陆以珠江三角洲为中心,东部、西部和北部三面山地丘陵围绕,形成麒麟状的港湾形势。大湾区属亚热带季风气候,气候温和,雨量充沛,年均气温在20.5—22.5℃之间,年均降雨量在1300.0—1700.0mm之间,年平均相对湿度71.0%—79.0%,区域内部的植被类型以亚热带常绿阔叶林和针阔混交林为主。

1.2 数据来源及处理

本文所利用的归一化植被指数数据是来自MODIS卫星的2015年MOD13Q1产品,该数据集的时间分辨率为16d,空间分辨率是250m,本文首先利用最大值合成法将该数据集处理成了月值数据集^[29]。本文获取的气象数据包括2015年月均气温、月总降水量和月总太阳辐射量,下载于中国气象数据共享服务网,本文将这些基于站点的气象数据进行利用克里金插值,以获得区域连续的空间气象数据^[30-32]。土壤数据来自于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD)。本文利用的陆地生态系统类型数据源于欧空局(ESA)的2000年和2015年CCI-LC产品,空间分辨为300m,该数据一共提供了37种不同的生态系统类型,本文将这些陆地生态系统类型重新进行了归类^[33](表1)。由于CCI-LC产品最新数据为2015年,为了与之统一,本文只计算了2015年的植被NPP数据。最后,本文统一数据空间分辨为300m,空间投影为兰勃特等积方位投影。

1.3 研究方法

估算陆地生态系统的固碳释氧服务包括估计固碳释氧量及其价值两部分内容,其中,固碳释氧量指陆地生态系统固定的碳元素和释放氧气的质量(简称固碳量和释氧量)的总和,而固碳释氧价值指固定碳元素和释放氧气的生态服务价值(简称固碳价值和释氧价值)的总和^[1-3]。本文先利用CASA模型(Carnegie Ames Stanford Approach)获得研究区2015年的植被NPP,然后,根据植被光合作用合成有机物质与其吸收CO₂和释放O₂之间的关系,计算出研究区陆地生态系统的固碳量和释氧量,最后,用货币衡量生产有机物质价值的思想,进一步获得陆地生态系统的固碳和释氧价值^[5-6,12]。

表 1 陆地生态系统类型分类及其最大光能利用率

Table 1 The terrestrial ecosystem types and their maximum light use efficiencies

一级陆地生态系统类型 Level 1 ecosystem-type	二级陆地生态系统类型 Level 2 ecosystem-type	CCI-LC 产品生态系统类型编号 Class values in CCI-LC Product	最大光能利用率 Maximum light energy utilization
农田 Cropland	农田	10,11,12,20,30,40	0.421
森林 Forest	常绿阔叶林	50	0.808
	落叶阔叶林	60,61,62	0.585
	常绿针叶林	70,71,72	0.378
	落叶针叶林	80,81,82	0.434
	阔叶针叶混交林	90	0.461
	稠密植被	100,160,170	0.421
	灌木	120,121,122	0.389
	稀疏植被	140,150,151,152,153	0.421
草地 Grassland	草地	110,130	0.482
湿地 Wetland	湿地	180	0.482
城市 Settlement	城市	190	0.482
其他 Others	裸地	200,201,202	0.482
	水体	210	0
	永久性冰雪	220	0

1.3.1 CASA 模型简介

CASA 模型是典型的参数模型,其充分考虑了环境条件以及植被本身的特征,只需要较少的资源及环境调控因子作为输入参数,就可方便有效地反演陆地植被 NPP,而且借助遥感数据可以脱离地面站点资料的条件束缚,实现区域尺度实时动态地估测植被 NPP^[34-35]。CASA 模型基本思想是认为植被 NPP 由植被吸收的光合有效辐射(The Absorbed Photosynthetically Active Radiation,APAR)及其光能利用率(ε)共同决定^[36]:

$$NPP = APAR \times \varepsilon \quad (1)$$

其中,植被吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射的吸收比例(The Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation,FPAR),由下面的公式给出。

$$APAR = SOLAR \times FPAR \times 0.5 \quad (2)$$

式中,SOLAR 指月总太阳辐射量(MJ/m^2);FPAR 指植被冠层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.4—0.7 μm)占太阳辐射总量的比例。

植被的光能利用率,受温度和水分等因子的约束,由下面的公式获得。

$$\varepsilon = T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times W_{\varepsilon} \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

其中, $T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 表示温度胁迫约束,它们分别由最适温度和月均气温来确定; W_{ε} 表示水分胁迫约束; $\varepsilon_{\max}$ 是植被最大光能利用率。

$\varepsilon_{\max}$ 是 CASA 模型的关键因子之一,它与植被类型、研究区位置及输入数据尺度有着密切的关系,本文的 $\varepsilon_{\max}$ 采用前人研究论文里的数据^[31-32](表 1)。CASA 模型的基本框架如图 1 所示,计算细节请参考前人的研究^[30,36]。

1.3.2 固碳释氧量的计算

研究表明 1 kg 碳元素相当于 2.2 kg 的有机物质^[37-38],而根据绿色植被光合作用化学方程式($6 CO_2 + 6 H_2O \xrightarrow{\text{光合作用}} C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$),可知植被每生产 1.00 kg 有机物质能固定 1.63 kg CO_2 并释放 1.19 kg 的 O_2 ,且 1 kg CO_2 中包含 0.27 kg 的碳元素。据此关系,大湾区陆地生态系统每年的固碳量与释氧量可以通过植被 NPP 总量得到。

$$W_{CO_2} = NPP \times 2.2 \times 1.63 \quad (4)$$

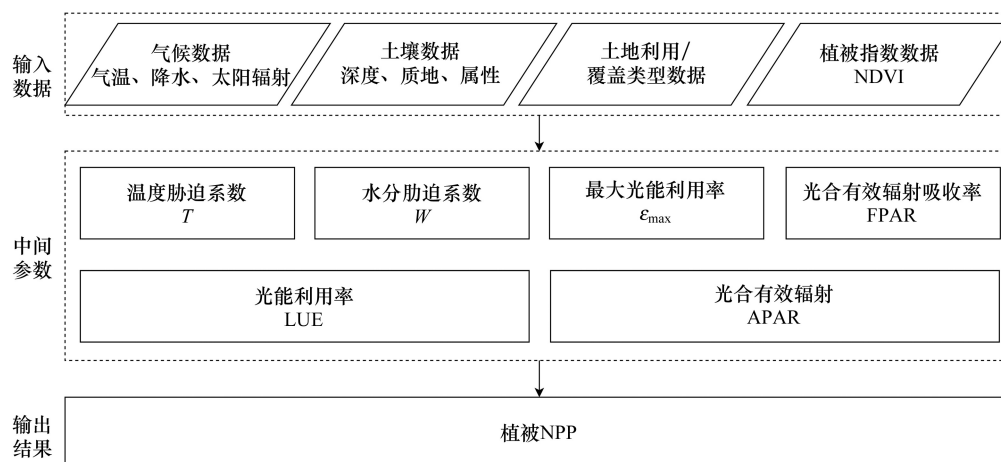


图1 CASA模型的基本框架

Fig.1 The framework of the CASA model

$$W_c = W_{\text{CO}_2} \times 0.27 \quad (5)$$

式中, W_{CO_2} 表示某生态系统单位面积固定的 CO_2 量 (g/m^2), W_c 表示该生态系统对应的单位面积固碳量 (g/m^2), NPP 表示该生态系统每年单位面积植被 NPP ($\text{g C}/\text{m}^2$)。

$$W_o = \text{NPP} \times 2.2 \times 1.19 \quad (6)$$

式中, W_o 表示某生态系统单位面积释氧量 (g/m^2)。

1.3.2 固碳释氧价值的计算

本文采用国际上通用的瑞典碳税法来估计固碳价值^[39-40]。该法规定的碳税率为 150 美元/t(碳), 结合 2015 年美元兑人民币的汇率(每 100 美元等于 622.84 元人民币), 可以折算出以人民币为度量的碳税率 (934.26 元/t), 根据该碳税率, 最终可以获得 2015 年大湾区陆地生态系统的固碳价值。

$$V_c = W_c \times 934.26 \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中, V_c 表示固碳价值 (元/ m^2), 10^{-6} 是 t 与 g 之间的转换系数。

本文利用工业制氧法来获得陆地生态系统的释氧价值^[6, 39]。

$$V_o = W_o \times 400 \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中, V_o 表示释氧价值 (元/ m^2), 400 是指工业制氧成本 (元/t), 10^{-6} t 与 g 之间的转换系数。

1.3.3 邻域代理法

本文旨在获得 2000—2015 年间大湾区陆地生态系统类型演变导致固碳释氧量及其价值的变化情况, 因此, 必须去除生态系统类型演变以外因素的影响作用, 通过获得陆地生态系统演变前后的植被 NPP 值 (Pre_NPP 和 Post_NPP), 并对比 Pre_NPP 和 Post_NPP 的差异, 最后运用公式 4—8 就可以获得固碳释氧量的变化及对应价值的变化。

本文利用“邻域代理法”来获得 Pre_NPP。该方法基于地理学第一定律, 认为某生态系统附近其他生态系统表面是该生态系统转化前的土地情况最佳代表^[22-23]。由于某一生态系统的演变是通过侵占其他不同类型生态系统来实现, 因此, 在具体运算时需要区分不同的用地类型。假设城市象元 A 是通过侵占农田实现扩张, 那么就通过象元 A 外围 30 km 半径范围内所有农田象元 (图 2 中红色边框部分) 的平均 NPP (Post_NPP) 来替换该城市象元的 NPP (Post_NPP), 从而获得城市扩张前 A 象元的植被 NPP (Pre_NPP)^[22-23]。通过这种方法可以获得与 Post_NPP 具有相同外界因素影响作用下的 Pre_NPP, 从而 Pre_NPP 和 Post_NPP 具有真正的可比性, 而且通过这种方法来获取 Pre_NPP 还可以避免额外计算其他时期植被 NPP 的麻烦。

2 结果与讨论

2.1 陆地生态系统现状及其变化情况

由图 3—4 和表 2 可知,大湾区陆地生态系统以农田和森林资源为主,2015 年它们的总面积分别为 28520.85 km²和 24877.00 km²,约占整个研究区陆地生态系统总面积的 82.33%。其中,农田主要分布在江门市、肇庆市、惠州市和广州市,约占大湾区农田总面积的 81.56%。此外,大湾区 88.92% 的森林资源也分布在这 4 个地级市,以肇庆市最多,接着分别是惠州市、江门市和广州市,构成大湾区外围的绿色屏障^[41]。2015 年大湾区的城市总面积为 7461.34 km²,主要分布在广州市、佛山市、东莞市和深圳市,它们的城市总面积占整个研究区城市总面积的比例约为 68.23%。草地和湿地覆盖范围较少,分别仅约为 497.63 km²和 206.28 km²,其中,草地在佛山市覆盖最广,而湿地在江门市和肇庆市覆盖最广。

图 3 和表 2 揭示,2000—2015 年,大湾区各陆地生态系统相互演变显著。其中,城市面积呈现明显的扩张态势,15 年间共扩张约 4091.64 km²,扩张比例为 21.42%,农田正好相反,每年约缩减 272.78 km²。由表 2 可知 78.42% 城市扩张面积来自侵占农田,此外,草地和湿地的主要转出对象为城市,说明人类建设活动是大湾区农田、草地和湿地流失的主要原因^[42]。2015 年森林面积为 24877.00 km²,15 年间共缩减了 345.72 km²,其中 92.29% 变成了耕地,这可能是由于当地实行占用耕地补偿制度导致的结果^[43]。最后,裸地和水体转出成其他生态系统的总面积为 235.32 km²,其中,最主要的是转出对象是城市,这可能是为适应社会经济快速发展的需要,缓解工业用地和城市建设用地的供需矛盾,大湾区相继实施大规模填海工程带来的结果^[44]。

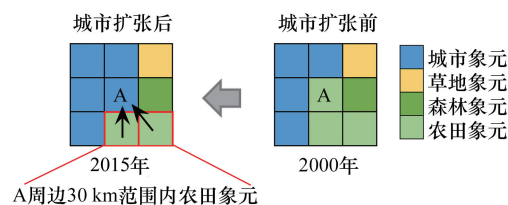


图 2 “邻域代理法”获得城市象元城市扩张前植被 NPP 原理图

Fig.2 A schematic diagram of the neighborhood proxy method

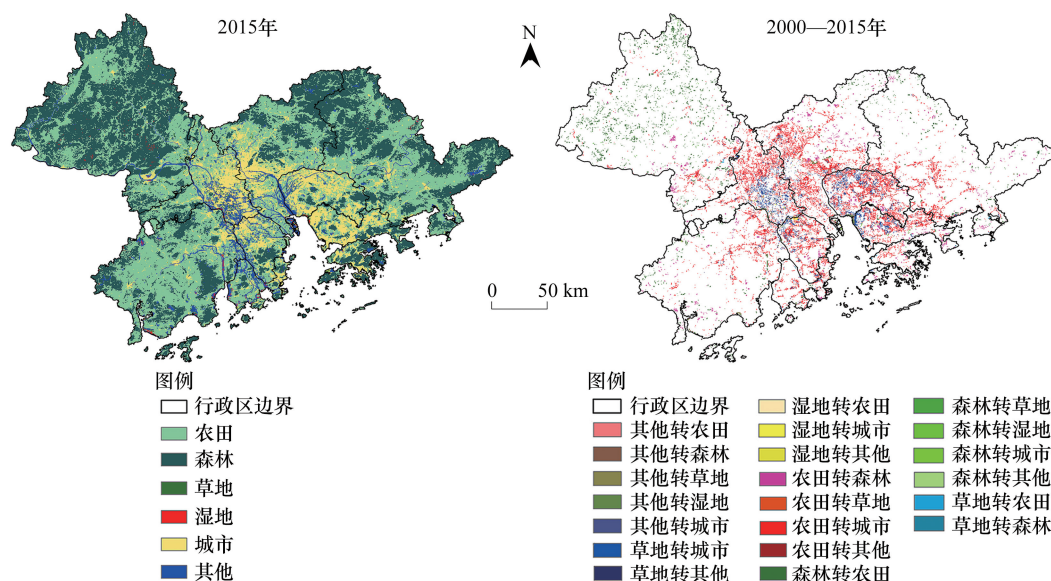


图 3 大湾区陆地生态系统现状和变化图

Fig.3 The terrestrial ecosystem types and their interconversion in the GBA

图中的“其他”特指的生态系统类型为“裸地和水体”

2.2 固碳释氧量现状及其变化

由表 3 和图 5 可知,2015 年大湾区陆地生态系统固碳量为 9166.56 G g,释氧量为 88881.69 G g,固碳释氧量主要由肇庆市、惠州市、江门市和广州市四个地级市的陆地生态系统产生^[41],它们的固碳释氧量是整个研

究区固碳释氧量的 84.71%。此外,各行政区的单位面积固碳释氧量各不一样,且各行政区固碳释氧总量的排序和单位面积固碳释氧量排序有所变化,例如,香港特别行政区在各行政区单位面积固碳释氧量排名第五,但在各行政区固碳释氧总量排名第八,这是因为香港特别行政区市辖陆地范围相对较小。此外,珠海市的市辖陆地范围比香港特别行政区要大,但固碳释氧量却比香港特别行政区要小,这是因为香港特别行政区平均单位面积固碳量和释氧量分别为 132.67 g/m²和 1286.37 g/m²,比珠海市的(87.99 g/m²和 853.15 g/m²)要大得多。由此可见,一个生态系统的总固碳释氧量是由其平均单位面积固碳释氧量和总覆盖面积共同决定的,这与前人研究发现相吻合^[22]。

表 2 大湾区各陆地生态系统相互演变及面积变化情况表

Table 2 The interconversions among terrestrial ecosystems and their corresponding area changes in the GBA

2000 年陆地生态系统类型 Ecosystem-type in 2000	转出对象 Ecosystem-type in 2015	转出面积 Area loss/km ²	转出总面积 Gross area loss/km ²	转入总面积 Gross area gain/km ²	净增总面积 Net area change/km ²	变化比例 Ratio of net area change	2015 年总面积 Total area in 2015/km ²
农田 Cropland	森林	359.22	3571.97	700.61	-2871.36	-9.15%	28520.85
	草地	0.41					
	城市	3208.63					
	裸地和水体	3.71					
森林 Forest	农田	661.79	717.09	371.37	-345.72	-1.37%	24877.00
	草地	2.68					
	湿地	16.79					
	城市	33.78					
	裸地和水体	2.06					
草地 Grassland	农田	13.49	727.29	34.91	-692.38	-58.18%	497.63
	森林	3.50					
	城市	709.06					
	裸地和水体	1.24					
湿地 Wetland	森林	0.62	42.43	87.33	44.9	27.82%	206.28
	城市	40.58					
	裸地和水体	1.24					
城市 Settlement	无	0	0	4091.64	4091.64	121.42%	7461.34
裸地和水体	农田	25.33	235.32	8.24	-227.08	-6.45%	3295.24
Bare areas and water	森林	8.03					
	草地	31.82					
	湿地	70.55					
	城市	99.59					

表中“转出”指某陆地生态系统转出成其他类型,“转入”是指其他类型的陆地生态系统转变成某陆地生态系统,“净增总面积”等于“转入总面积”与“转出总面积”的差值,“变化比例”是指某陆地生态系统净增总面积与其 2000 年总面积的比值

根据表 3 的结果,在陆地生态系统相互演变的影响下,2000—2015 年大湾区固碳量和释氧量分别减少了 53.49 G g 和 518.65 G g。东莞市的固碳量和释氧量减少程度最大(总量分别为 14.14 G g 和 137.09 G g),接着是惠州市>佛山市>深圳市>江门市>肇庆市>中山市>广州市>澳门特别行政区。珠海市和香港特别行政区的陆地生态系统固碳量和释氧量有所增加,进一步研究发现这是因为,2000—2015 年珠海市森林生态系统固碳量和释氧量净增了 0.82 G g 和 7.92 G g,有效地抵消了其他陆地生态系统固碳量和释氧量的损失值;而对于香港特别行政区,虽然城市扩张导致固碳量和释氧量损失了 0.44 G g 和 4.27 G g,但其他生态系统的固碳量和释氧量有所增加,其中,森林生态系统的固碳量和释氧量增加了 0.90 G g 和 8.71 G g 抵消城市扩张导致的固碳量和释氧量的损失值。由此可见,陆地生态系统的固碳释氧量的变化情况与其内部演变类型有密切关系^[45,46],当某陆地生态系统变化主要以退化为较低固碳释氧量的生态系统时,其固碳释氧量会减少,反之当

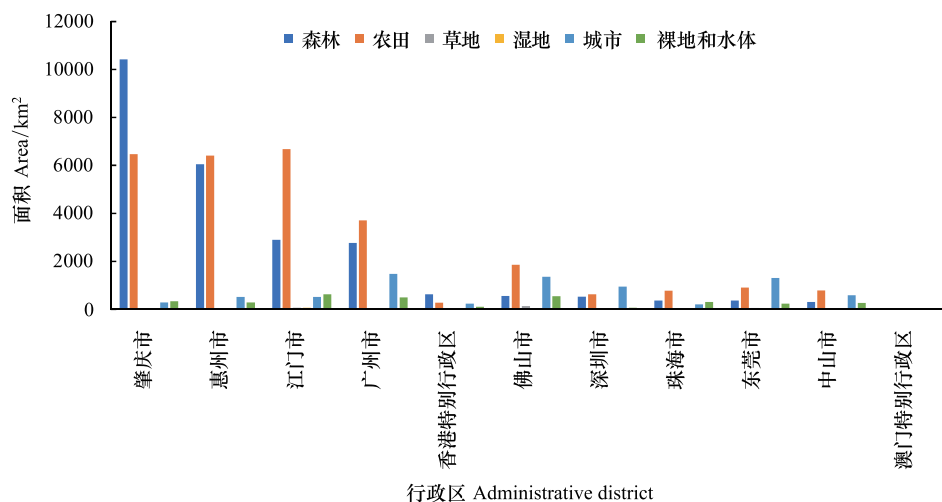


图4 大湾区2015年各行政区不同陆地生态系统总面积对比

Fig.4 Comparison of total area for different terrestrial ecosystems of each administrative district in the GBA in 2015

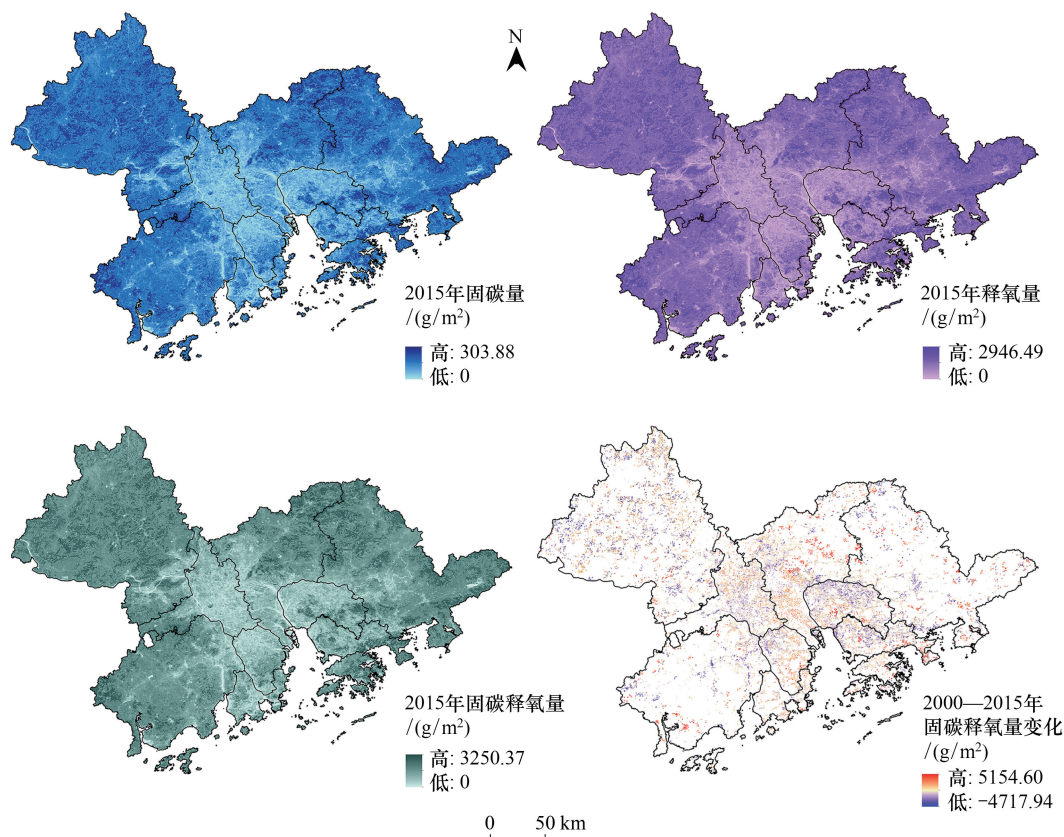


图5 大湾区陆地生态系统固碳释氧量情况分布图

Fig.5 The spacial distributions of the carbon fixation and oxygen release services and their changes in the GBA

固碳释氧量变化情况图是指由2000—2015年陆地生态系统演变导致的固碳释氧量变化情况

某陆地生态系统变化主要以转变为较高固碳释氧量的生态系统时,其固碳释氧量会增加。

2.3 固碳释氧价值现状及其变化

从表3可以得出,2015年大湾区所有陆地生态系统的固碳释氧价值约为662.63亿元,其中,肇庆市、惠州市、江门市和广州市的固碳释氧价值最高(图6)约分别占研究区固碳释氧总价值的31.83%、23.09%、17.12%

和 12.67%。佛山市的固碳价值(13.43 亿元)和释氧价值(15.55 亿元)约是广州市的三分之一,深圳市的固碳释氧价值与东莞市的相当,中山市和珠海市的固碳释氧价值较为接近,约为香港特别行政区的固碳和释氧价值的两倍,而澳门特别行政区的固碳和释氧价值贡献较低(仅约为 0.06 亿元和 0.07 亿元)。表 3 和图 6 揭示,2000—2015 年大湾区陆地生态系统演变造成固碳和释氧价值分别约损失了 1.79 亿元和 2.06 亿元(表 3),合计约 3.85 亿元,除了香港特别行政区和珠海市的固碳释氧价值出现净增加外,其余行政区的固碳释氧价值均为净负增长,其中,东莞市、惠州市和佛山市固碳释氧价值损失量最大,约是整个研究区固碳释氧价值变化量的 63.29%。这与周永杰等^[41]发现生态系统演变减少了大湾区生态服务价值的总体趋势基本一致,由此可见陆地生态系统演变对固碳释氧服务具有重要且复杂的影响^[45-47]。

表 3 大湾区各行政区陆地生态系统固碳释氧服务情况对比

Table 3 Comparison of the carbon fixation and oxygen release services and their changes in the GBA

行政区 Administrative district	2015 年固碳释氧情况 Carbon fixation and oxygen release services in 2015					2000—2015 年固碳释氧变化情况 Carbon fixation and oxygen release services changes from 2000—2015				
	固碳 量/G g	释氧 量/G g	固碳价 值/亿元	释氧价 值/亿元	固碳释氧 价值/亿元	固碳 量/G g	释氧 量/G g	固碳价 值/亿元	释氧价 值/亿元	固碳释氧 价值/亿元
肇庆	2918.01	28293.85	97.76	113.18	210.94	-3.44	-33.34	-0.12	-0.13	-0.25
惠州	2116.43	20521.57	70.91	82.09	152.99	-10.26	-99.45	-0.34	-0.40	-0.74
江门	1569.43	15217.66	52.58	60.87	113.45	-6.70	-64.94	-0.22	-0.26	-0.48
广州	1161.38	11261.10	38.91	45.04	83.95	-1.22	-11.82	-0.04	-0.05	-0.09
佛山	400.98	3888.00	13.43	15.55	28.99	-9.31	-90.26	-0.31	-0.36	-0.67
深圳	263.79	2557.78	8.84	10.23	19.07	-7.15	-69.36	-0.24	-0.28	-0.52
东莞	254.02	2463.01	8.51	9.85	18.36	-14.14	-137.09	-0.47	-0.55	-1.02
香港	170.48	1653.07	5.71	6.61	12.32	0.62	5.98	0.02	0.04	0.06
中山	158.00	1532.06	5.29	6.13	11.42	-1.99	-19.30	-0.07	-0.08	-0.14
珠海	152.34	1477.15	5.10	5.91	11.01	0.23	2.20	0.01	0.01	0.02
澳门	1.70	16.46	0.06	0.07	0.12	-0.13	-1.27	0.00	-0.01	-0.01
合计 Total	9166.56	88881.69	307.10	355.53	662.63	-53.49	-518.65	-1.79	-2.06	-3.85

G g=10⁹ g

大湾区 2015 年各陆地生态系统的固碳释氧价值差异较大(图 7),且呈现两极分化的特点,绝大部分(91.03%)集中于森林和农田这两个生态系统^[41],其中,森林生态系统的固碳和释氧价值最高,分别约为 155.74 亿元和 180.29 亿元,农田生态系统的固碳和释氧价值也较高,分别约为 123.84 亿元和 143.36 亿元。相比之下,城市生态系统 2015 年的固碳和释氧价值较低,分别只有 18.52 亿元和 21.44 亿元。2000—2015 年陆地生态系统相互演变对固碳释氧价值产生了重要影响,其中森林的固碳释氧价值增加了 1.16 亿元,其主要原因是有较大范围固碳释氧能力较低的生态系统转换为能力较高的森林生态系统,例如,农田和灌木等转变为常绿阔叶林带来固碳释氧价值增加 2.85 亿元,农田和常绿针叶林转变为稠密植被带来固碳释氧价值增加了 0.75 亿元。但陆地生态系统变化给除森林外的其他生态系统的固碳释氧价值均带来了损失,其中,城市扩张带来较大的固碳和释氧价值损失,分别高达约 2.13 亿元和 2.47 亿元(图 7),其他生态系统的变化导致的固碳和释氧价值损失总量合约为 0.20 亿元和 0.23 亿元。由此可见,城市扩张是大湾区固碳释氧服务损失的主要驱动因素,因此,必需合理控制城市扩张,以使大湾区的生态系统变得更加稳定^[46-47]。

2.4 固碳释氧价值与生态系统类型的关系

为进一步探讨大湾区陆地生态系统演变对其固碳释氧价值的影响,本文基于 11 个行政区将它们 2015 年总固碳释氧价值和各陆地生态系统类型所占比重做相关分析^[47]。结果表明(表 4),城市生态系统与固碳释氧价值的相关性最高,且呈现强负相关关系,而森林呈强正相关,表明城市和森林的比重对本研究区的固碳释氧价值影响显著,且城市扩张将显著减少研究区的固碳释氧价值,而森林比重上升将有利于研究区固碳释氧价值的增加,这表明大湾区应该重视森林生态系统的保护并合理控制城市的扩张,这与前人的研究结论是相

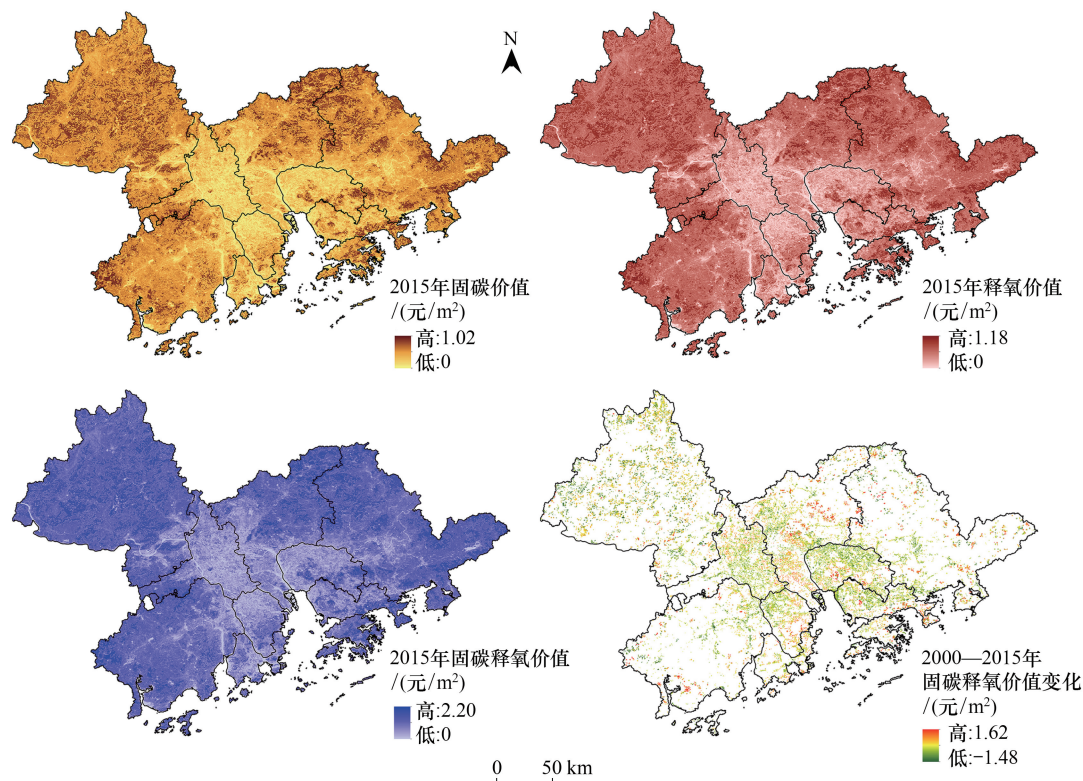


图6 大湾区陆地生态系统固碳释氧价值情况分布图

Fig.6 The spacial distributions of the carbon fixation and oxygen release services' value and their changes in the GBA

固碳释氧价值变化情况图是指由2000—2015年陆地生态系统演变导致的固碳释氧价值变化情况

符的^[47]。裸地与水体和草地也呈现强负相关性,这可能是由于这些生态系统在研究区内覆盖范围较小,且固碳释氧能力较农田和森林差,因此,这些生态系统的扩张将导致大湾区整体固碳释氧价值降低。最后,农田和湿地与研究区固碳释氧价值的相关性并不强。

表4 大湾区固碳释氧价值与陆地生态系统类型的相关系数

Table 4 Correlations between carbon fixation and oxygen release services' value and terrestrial ecosystem structure

	农田 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	城市 Settlement	裸地和水体 Bare areas and Water
相关性 Correlations	0.46	0.74	-0.67	-0.37	-0.75	-0.70

当相关系数绝对值0.8—1.0为极强相关,0.6—0.8为强相关,0.4—0.6为中等程度相关,0.2—0.4为弱相关,0.0—0.2为极弱相关或无相关

3 结论

本文利用“邻域代理法”获得了陆地生态系统演变导致的固碳释氧量和价值变化,避免了前人研究需要计算不同时期陆地生态系统固碳释氧量和价值数据的麻烦,且解决了因外界因素不一致导致的不同时期数据不可对比的问题,研究思路具有一定的推广价值。本文的主要结论是:大湾区的陆地生态系统以农田和森林资源为主,陆地生态系统的固碳释氧量和价值集中于肇庆市、惠州市、江门市和广州市。2000—2015年陆地生态系统演变显著,其中,城市扩张明显,导致农田生态系统显著减少,且由于城市大量扩张使得大湾区固碳量和释氧量及其价值总体上呈现下降趋势。在大湾区,城市、草地和裸地与水体覆盖面积与固碳释氧价值呈现强负相关,其扩张会促使研究区的生态系统固碳释氧价值逐渐减少,林地覆盖面积与固碳释氧价值呈现强正相关,其比重的增加将有利于研究区的生态系统固碳释氧价值的培育。

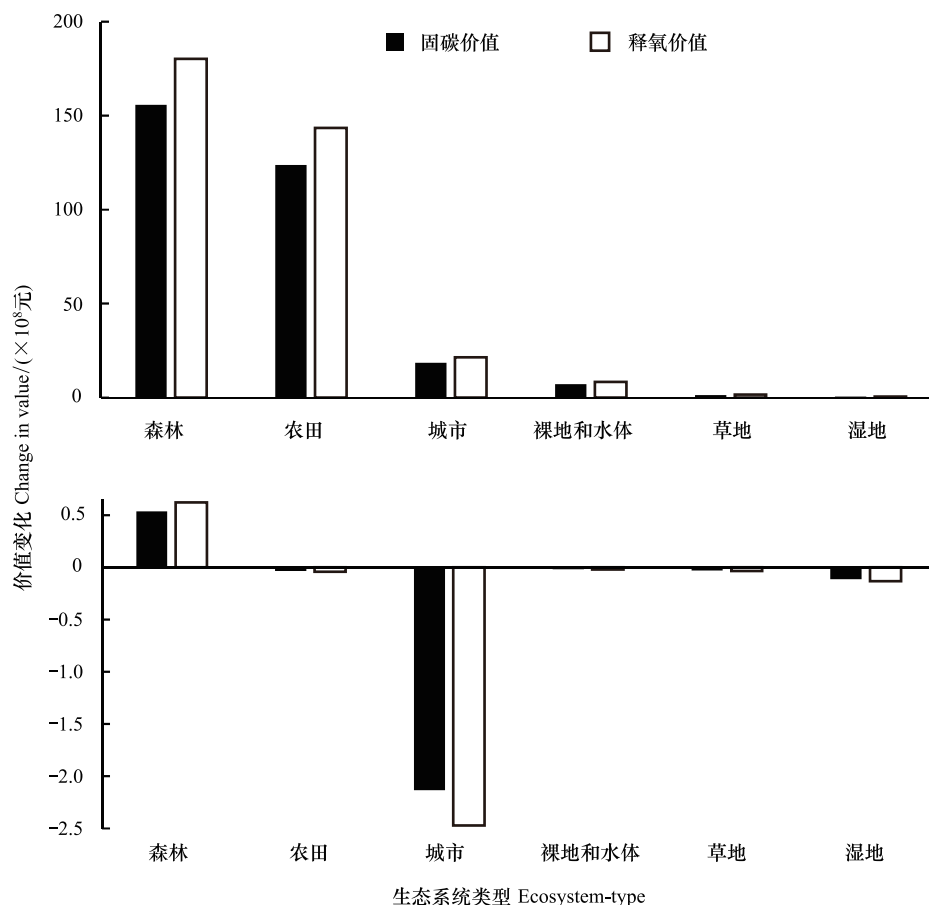


图7 大湾区各生态系统类型固碳释氧总价值及其变化情况对比

Fig.7 Comparison the amount value of carbon fixation and oxygen release services and their changes for each terrestrial ecosystem in the GBA

基于本文的研究,建议在今后社会经济发展中,大湾区应当优化调整陆地生态系统类型,合理控制城市生态系统的规模及其扩张态势,并重视保护森林和农田生态系统,减少人类活动在生态系统演变中的作用,保护并增强自然演变过程,增强生态系统的稳定性,提升生态系统安全性,促进社会经济的持续健康发展。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [3] Ren Z Y, Zhang Y F, Li J. The value of vegetation ecosystem services: a case of Qinling-Daba Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(2): 195-200.
- [4] 唐佳, 陈芝兰, 方江平. 基于能值的西藏森林生态系统固碳释氧价值估算. *高原农业*, 2018, 2(5): 519-525.
- [5] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评. *地理研究*, 2013, 32(4): 663-670.
- [6] 张静, 任志远, 张嘉琪. 汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测评. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(2): 242-249.
- [7] 张翀, 任志远. 陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评. *地理研究*, 2015, 34(8): 1522-1534.
- [8] Zhang T, Cao G C, Cao S K, Zhang X G, Zhang J, Han G Z. Dynamic assessment of the value of vegetation carbon fixation and oxygen release services in Qinghai Lake basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 79-84.
- [9] 贾庆堂, 龚斌, 张林波, 张义文, 孙德泉. 基于 NPP 模型的西藏工布地区固碳释氧能力分析. *安徽农业科学*, 2012, 40(1): 357-359.
- [10] 李俊梅, 龚相瀚, 张雅静, 段昌群, 高伟. 滇池流域森林生态系统固碳释氧服务价值评估. *云南大学学报: 自然科学版*, 2019, 41(3): 629-637.
- [11] 周颖, 周夏飞, 马国霞, 於方. 基于 2015 年遥感数据的中国生态系统固碳释氧价值评估//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文

- 集(第四卷). 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [12] 徐茜, 王晓峰, 任志远, 李晶. 草地植被净第一性生产力及固碳释氧量的估算. 测绘科学, 2012, 37(5): 132-134, 144-144.
- [13] 王俊, 李巧云, 关欣. 常德津市农田生态系统服务功能的价值评估. 湖南农业科学, 2013, (7): 76-78, 81-81.
- [14] 王致萍, 林栋. 兰州银滩湿地区域生态经济价值评估. 中国沙漠, 2008, 28(2): 322-325.
- [15] Ducat D C, Silver P A. Improving carbon fixation pathways. Current Opinion in Chemical Biology, 2012, 16(3): 337-344.
- [16] Bar-Even A. Daring metabolic designs for enhanced plant carbon fixation. Plant Science, 2018, 273: 71-83.
- [17] 朱紫菱, 谢小魁, 熊俊, 孙广睿, 杜峯屹, 韩天政, 梅婷. 长沙市城市森林覆盖率变化及固碳释氧价值量评估. 林业科技通讯, 2019, (4): 6-9.
- [18] 范建忠, 李登科, 周辉. 陕西省退耕还林固碳释氧价值分析. 生态学杂志, 2013, 32(4): 874-881.
- [19] 王姝, 张艳芳, 位贺杰, 张宏运. 生态恢复背景下陕甘宁地区 NPP 变化及其固碳释氧价值. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1421-1428.
- [20] 高阳, 金晶炜, 程积民, 苏纪帅, 朱仁斌, 马正锐, 刘伟. 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状. 应用生态学报, 2014, 25(3): 639-646.
- [21] 平晓燕, 王铁梅, 卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展. 植物生态学报, 2013, 37(1): 80-92.
- [22] Wen Y Y, Liu X P, Bai Y, Sun Y, Yang J, Lin K, Pei F S, Yan Y C. Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China. Journal of Environmental Management, 2019, 240: 75-83.
- [23] Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J, Ricketts T. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434-443.
- [24] Liu X P, Pei F S, Wen Y Y, Li X, Wang S J, Wu C J, Cai Y L, Wu J G, Chen J, Feng K S, Liu J G, Hubacek K, Davis S J, Yuan W P, Yu L, Liu Z. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. Nature Communications, 2019, 10: 5558.
- [25] Fu Y C, Lu X Y, Zhao Y L, Zeng X T, Xia L L. Assessment impacts of weather and Land Use/Land Cover (LULC) change on urban vegetation Net Primary Productivity (NPP): a case study in Guangzhou, China. Remote Sensing, 2013, 5(8): 4125-4144.
- [26] 刘艳艳, 王少剑. 珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度. 人文地理, 2015, 30(3): 64-71.
- [27] 甘琳, 陈颖彪, 吴志峰, 千庆兰, 郑子豪. 近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2453-2462.
- [28] 中国社会科学院. 应对气候变化报告 2019: 防范气候风险. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
- [29] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [30] Wen Y Y, Liu X P, Pei F S, Li X, Du G M. Non-uniform time-lag effects of terrestrial vegetation responses to asymmetric warming. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252: 130-143.
- [31] Pei F S, Li X, Liu X P, Lao C H. Assessing the impacts of droughts on net primary productivity in China. Journal of Environmental Management, 2013, 114: 362-371.
- [32] Jiang C, Wu Z F, Cheng J, Yu Q, Rao X Q. Impacts of urbanization on net primary productivity in the Pearl River Delta, China. International Journal of Plant Production, 2015, 9(4): 581-598.
- [33] Li W, MacBean N, Ciais P, Defourny P, Lamarche C, Bontemps S, Houghton R A, Peng S S. Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992-2015). Earth System Science Data, 2018, 10(1): 219-234.
- [34] Potter C S, Klooster S, Brooks V. Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales. Ecosystems, 1999, 2(1): 36-48.
- [35] Potter C, Klooster S, Genovese V. Net primary production of terrestrial ecosystems from 2000 to 2009. Climatic Change, 2012, 115(2): 365-378.
- [36] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [37] 王艳艳, 杨明川, 潘耀忠, 朱文泉, 龙中华, 刘旭捷, 顾晓鹤. 中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算. 生态环境, 2005, 14(4): 455-459.
- [38] 陈明辉, 陈颖彪, 郭冠华, 艾彬. 快速城市化地区生态资产遥感定量评估--以广东省东莞市为例. 自然资源学报, 2012, 27(4): 601-613.
- [39] 梁泽胜. 都兰县天然草地植被固碳释氧价值评估. 青海畜牧兽医杂志, 2011, 41(5): 56-57.
- [40] 《中国生物多样性国情研究报告》编写组. 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 环境科学出版社, 1998.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 肖北生, 宁晓锋. 广东省耕地和基本农田保护态势与对策分析. 广东农业科学, 2013, 40(11): 227-231, 236.
- [44] Zhou Z J, Du J J, Liu Y L. Evolution, development and evaluation of eco-transportation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 97-107.
- [45] Solomon N, Segnon A C, Birhane E. Ecosystem service values changes in response to land-use/land-cover dynamics in dry afro-montane forest in northern Ethiopia. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4653.
- [46] Hasan S, Shi W Z, Zhu X L. Impact of land use land cover changes on ecosystem service value - A case study of Guangdong, Hong Kong, and Macao in South China. PLoS One, 2020, 15(4): e0231259.
- [47] 叶长盛, 董玉祥. 珠江三角洲土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 热带地理, 2010, 30(6): 603-608, 621-621.