

DOI: 10.5846/stxb202003270717

王世豪, 黄麟, 徐新良, 徐淑琬. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416.

Wang S H, Huang L, Xu X L, Xu S W. Spatial and temporal evolution of ecosystem services and its trade-offs and synergies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8403-8416.

粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权衡与协同特征

王世豪^{1,2}, 黄麟^{1,*}, 徐新良^{1,3}, 徐淑琬⁴

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 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资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

4 中国人民大学附属中学通州校区, 北京 101100

摘要: 打造国际一流湾区和世界级城市群的粤港澳大湾区, 生态保护、环境优化与城市发展、经济开放具有同等重要地位, 掌握其城镇化过程中生态系统及其服务变化状况有助于科学合理、有针对性的制定生态保护修复相关政策。基于 2000—2015 年粤港澳大湾区生态系统宏观格局变化, 分析了大湾区生态系统生产力、水源涵养、土壤保持服务的时空演化特征, 进而探讨了供给与调节服务之间的权衡与协同关系。结果表明: (1) 森林与农田是大湾区的主体生态系统, 面积占大湾区国土面积的 54.1% 和 22.8%, 近 15 年由于城镇面积快速增长 (增幅达 68.6%), 导致森林、农田、湿地面积不断减少。(2) 基于净初级生产力的供给服务量和土壤保持量整体上均呈现轻度增加趋势, 特别是江门、肇庆等生态服务主要提供区域; 东南部最高、北部次之、中部偏低的水源涵养量, 除西北部呈现增加趋势以外, 其它区域皆呈现减少趋势; 城镇扩张是生态系统供给、调节服务明显减少的主要影响因素。(3) 大湾区生态系统供给服务与水源涵养、土壤保持调节服务之间的相关关系均以协同为主, 然而, 在大湾区东北部和南部的广州、惠州、江门等区域呈现明显的权衡关系, 提示大湾区发展过程中, 需要在这些呈现权衡关系的区域实施有针对性的生态保护修复措施, 优化绿地结构、保护生态空间, 减少城镇扩张和不合理的人类活动对生态系统服务的消极影响, 建设生态优美、文化繁荣的美丽湾区。

关键词: 粤港澳大湾区; 生态系统服务; 时空演化; 权衡与协同

Spatial and temporal evolution of ecosystem services and its trade-offs and synergies in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

WANG Shihao^{1,2}, HUANG Lin^{1,*}, XU Xinliang^{1,3}, XU Shuwan⁴

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 Tongzhou Campus, The High School Affiliated to Renmin University of China, Beijing 101100, China

Abstract: In the process of developing the world-class bay area and urban agglomeration in the Guangdong-Hong Kong-Macao (GHM) Greater Bay Area, ecological protection and environmental optimization are equally important with urban development and economic openness. Understanding the changes in ecosystem services during the urbanization process of the

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项 (XDA20010302)

收稿日期: 2020-03-27; 网络出版日期: 2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsrr.ac.cn

GHM Greater Bay Area will help policymakers formulate scientific, rational, and targeted policies on ecological protection. Based on the macro-ecosystem changes in the GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015, this paper analyzes the spatial and temporal evolution characteristics of ecosystem productivity, water conservation, and soil conservation services in the GHM Greater Bay Area during the past 15 years, and discusses the relationship of trade-offs and synergies between supply and regulation services. The results show that: (1) forests and farmlands are the main ecosystems of the GHM Greater Bay Area, accounting for 54.1% and 22.8% of the land area. Due to the rapid expansion of the urban area (increase of 68.6% from 2000 to 2015), the areas of forests, farmlands, and wetlands have continued to decrease in the past 15 years. (2) The ecosystem supply services (based on Net Primary Productivity, NPP) and soil conservation show a slight increase, especially the main service supply areas in Jiangmen and Zhaoqing of the GHM Greater Bay Area. The water conservation reaches its highest along the southeast coast, and followed by the northern region, while the central region of the GHM Greater Bay Area is relatively lower. Except for the increasing trend observed in the northwest region, other regions are showing a decreasing trend in water conservation. Urban expansion is the main influencing factor for the apparent reduction of ecosystem services. (3) The correlation between ecosystem services and water and soil conservation services in the GHM Greater Bay Area mainly shows a synergy, while the relationship is mainly a trade-off in south and northeast of the GHM Greater Bay Area (Guangzhou, Huizhou and Jiangmen). It is suggested that during the development of the GHM Greater Bay Area, special attentions should be paid to the targeted ecological protection measurements in areas where the supply and regulation services are trade-offs. Relevant departments need to implement a strict ecological environment protection system, and adopt measures such as optimizing the structure of green space and protecting ecological space to reduce the negative impact of urban expansion and unreasonable human activities on ecosystem services, and build the Greater Bay Area with a beautiful ecological environment and cultural prosperity.

Key Words: GHM Greater Bay Area; ecosystem services; spatial and temporal evolution; trade-offs and synergies

生态系统直接或间接地为人类提供物质与非物质惠益即生态系统供给、调节、支持和文化等服务^[1-4]。近年来,生态系统服务评估研究发展迅速,多通过物质量分析生态系统服务的可持续性,利用价值量开展不同时段、不同区域生态系统服务的变化评价^[5]。1997年, Costanza 等区分 17 种生态系统服务类型估算了全球生态系统服务价值^[6-8]。国内,谢高地等^[3,7]基于 Costanza 等研究建立了中国生态系统单位面积服务价值当量表。许多研究沿用当量法开展不同区域的生态系统服务评估,但由于生态系统及其服务的空间异质性、评估复杂性,指标选取不统一以及评价方法差异等原因,导致结果具有极大地不确定性^[5,9],评价内容和尺度难以满足实践需求^[10]。此外,由于生态系统服务种类多样性、空间分布不均衡以及人类使用的选择性,生态系统服务之间的关系出现了此消彼长的权衡和相互增益的协同等变化^[11]。科学合理地估算生态系统服务,量化描述其时空演化特征,分析主要生态系统服务之间的相关关系,可为生态系统管理与决策的制定提供重要依据^[12-13],对保护生态环境、维护人类社会福祉、促进人与自然和谐发展大有裨益^[14]。

近几十年,伴随经济社会高速发展与人口增长快速城市化是全球最显著的土地利用变化特征,使得生态系统服务能力较弱的生活、生产空间占用了生态空间^[15],极大地改变了生态系统结构并导致生态系统服务呈现复杂的时空变化特征^[14,16],由此引发了水污染、大气污染、温室效应等一系列生态环境问题^[17],严重威胁城市地区的可持续发展和居民生活质量^[18]。因此,如何降低城市化对生态系统服务的影响,实现可持续地城市地区发展,已成为城市化研究的热点问题^[19-22]。众多学者开展了城市化地区的生态系统服务研究,利用 InVEST 模型模拟了闽三角城市群水源涵养情景以及土地利用变化对其的影响^[23];基于生态系统服务价值当量估算了武汉城市圈、京津冀、长三角等城市群地区的生态系统服务价值,分析了城市土地利用结构与生态系统服务之间的关系^[14,24-26]。然而,对于城市化影响生态系统服务以及引起各类生态系统服务相互关系变化的时空过程,目前相关研究较少、政策方面考虑较为缺乏,不利于生态文明背景下的城市群地区发展。

粤港澳大湾区由于特殊的地理位置与发展机遇,受到国内外广泛关注^[27],成为全球人口高密度聚集的城市群地区之一^[28],快速城市化进程改变了城市的空间格局和自然景观^[29],同时也出现了植被面积减少、物种多样性降低、海平面上升、洪涝规模增大等一系列环境污染和生态破坏问题,生态系统供给与调节服务降低,严重阻碍区域经济的可持续发展^[30-31]。针对粤港澳大湾区生态系统服务,李婧贤等^[32]构建了一个生态系统服务分类体系并分析其空间分布特征;甘琳等^[33]从自然生态、城市扩张、生态系统服务方面选取生态敏感性评价因子并构建指标体系,分析了近 20 年大湾区生态敏感性时空变化;林媚珍等^[30]利用 InVEST 模型分析了近 15 年大湾区碳储量、土壤保持等生态系统服务的时空变化以及景观格局指数变化的影响。然而,多数研究侧重于生态系统服务估算,对城市化地区生态系统服务演化规律及其权衡与协同关系的研究较为欠缺^[10]。

本文以粤港澳大湾区作为我国城市群发展的典型研究区,基于对 2000—2015 年大湾区生态系统宏观格局变化的分析,揭示了大湾区生态系统供给服务与水源涵养、土壤保持调节服务的时空演化特征,进而探讨供给服务与调节服务之间的权衡与协同关系,通过了解过去十几年大湾区城市化进程中生态系统服务及其相互关系的动态本底状况,掌握城市化对生态系统变化的正面和负面影响、生态保护的薄弱区域以及未来需要加强保护的重要区域。本研究对于粤港澳大湾区经济发展同时开展生态保护、改善大湾区生态环境质量、实现城市化的健康发展,具有极为重要的现实意义和科学价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区总面积 5.6 万 km²,包括广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 市和我国香港、澳门 2 个特别行政区,2017 年末总人口约 7000 万人。粤港澳大湾区与美国纽约湾区、旧金山湾区、日本东京湾区并称为世界四大湾区,是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一^[34]。大湾区以亚热带季风气候为主,终年温暖湿润,年均温 21—23℃,年均降水量 1500 mm 以上。多雨季节与高温季节同步,植被类型以亚热带常绿阔叶林为主^[32]。

1.2 生态系统类型及变化信息提取

2000、2015 年粤港澳大湾区生态系统类型及其变化信息源于中国科学院资源环境科学数据中心的土地利用变化与土地覆被数据集^[35],该数据集是以美国陆地卫星 Landsat TM/ETM+图像为主要信息源,通过人工目视解译获得,空间分辨率为 100 m×100 m,土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地、未利用土地等 6 个一级类和 25 个二级类。将土地利用类型分类合并转换为农田、森林、草地、湿地、城镇等生态系统类型,进而统计分析大湾区近十几年生态系统类型与面积的变化趋势。

1.3 生态系统服务量化方法

1.3.1 生态系统净初级生产力

生态系统净初级生产力(NPP, Net Primary Productivity)是绿色植被在单位面积、单位时间内累积的有机物数量,由光合作用获得的有机质总量扣除植被自身生长和代谢消耗后的剩余部分,它直接反映了自然环境条件下生态系统的供给能力^[36],可作为生态系统供给服务量化的指标。本文中 NPP 数据来自于 MODIS 产品中的 MOD17A3 数据集,是通过 BIOME-BGC 模型计算出全球陆地植被净初级生产力年际变化的资料^[37-38],空间分辨率为 1 km×1 km,数据时间序列为 2000—2015 年。该数据已广泛应用于生态环境变化监测、植被生物量估算、碳循环和全球变化等研究^[39-41]。

1.3.2 水源涵养服务量

采用降水贮存量法^[42-44]估算粤港澳大湾区森林、湿地、草地生态系统通过调节水量和净化水质所产生的水源涵养服务量,公式表示为:

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

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

式中, W 为与裸地相比得到的森林、湿地和草地生态系统涵养水分的增加量 (m^3), A 为生态系统面积 (hm^2), P_r 为产流降水量 (mm), P 为年均降水量 (mm), K 为产流降水量占降水总量的比例; R 为与裸地相比生态系统减少径流的效益系数。通过已发表文献搜集获得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, 得到单点产流降雨量占降雨总量的比例, 进而与多年平均河川径流系数建立线性关系, 得到 K 值的空间分布。森林 R 值主要通过搜集已有文献资料, 草地 R 值根据植被覆盖度^[42,45]计算。

1.3.3 土壤保持服务量

利用生态系统土壤保持量 (SC) 衡量生态系统保育土壤的能力, 土壤保持量定义为生态系统在极度退化状况下土壤侵蚀量 (SEd) 与现实状况下土壤侵蚀量 (SEr) 的差值。采用修正通用水土流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 估算土壤侵蚀量 (SE), 该方程认为土壤水蚀强度主要由降雨侵蚀力因子 (Rse)、土壤可蚀性因子 (Kse)、坡长因子 (L)、坡度因子 (S)、覆盖和管理因子 (C)、水土保持措施因子 (Psc) 等决定, 因此表示为:

$$SC = SEd - SEr \quad (3)$$

$$SE = Rse \times Kse \times L \times S \times C \times Psc \quad (4)$$

$$Kse = [2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25 (St - 2) + 2.5 (P - 3)] / 100 \times 0.1317 \quad (5)$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \quad (6)$$

$$\beta = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right) / (3.0 \times \sin \theta^{0.8} + 0.56) \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin(s) + 0.03, & \theta < 9\% \\ 16.8 \sin(s) - 0.5, & 9 \leq \theta \leq 18\% \\ 21.91 \sin(s) - 0.96 & \theta > 18\% \end{cases} \quad (8)$$

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f & 0 < f \leq 78.3\% \\ 0 & f > 78.3\% \end{cases} \quad (9)$$

式中, 利用基于日降雨量的半月降雨侵蚀力模型^[46]来估算 Rse ; 利用 Nomo 图法计算 Kse , 其中, OM 是土壤有机质含量百分比 (%), M 是土壤粉粒、极细砂与粘粒百分比之积, St 是土壤结构系数, Psc 是渗透等级, 这些土壤属性数据均来自于 1:100 万土壤数据库。基于 McCool 等^[47]和刘宝元等^[48]的方法估算 L 和 S , 其中, λ 为坡长 (m), 计算 L 时把生态系统类型边界、道路、河流、沟塘湖泊等地表要素作为径流的阻隔因素, 改进了传统算法中通过相邻栅格间的坡向以及坡度变化率确定坡长终止点的方法, 避免了坡长因子的高估。根据蔡崇法^[49]的方法计算确定 C 。

1.3.4 生态系统服务权衡与协同关系分析

以大湾区供给服务与水源涵养、土壤保持服务的多年变化趋势为基础, 基于逐像元空间相关分析方法, 探讨两两生态系统服务之间相关系数的绝对值大小及正负方向, 判断生态系统服务之间的权衡与协同关系。首先, 计算两两生态系统服务之间相应的相关系数与偏相关系数。

相关系数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

一阶偏相关系数计算公式如下:

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih} r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}} \quad (11)$$

式中, $r_{ij \cdot h}$ 表示在变量 i 和 j 在控制变量 h 后的一阶偏相关系数, r_{ij} 、 r_{ih} 、 r_{jh} 分别为两个变量的相关系数。

如果一阶偏相关系数为正,表明在排除另外一个服务的影响下,这两个生态系统服务之间为协同关系;一阶偏相关系数为负,说明为权衡关系;相关系数为零,则表明生态系统服务之间无相关关系。

根据偏相关系数的零假设检验 t 检验方法,判断生态系统服务之间相互关系的显著性。 t 检验公式如下:

$$t = \frac{\sqrt{n-k-2} \cdot r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (12)$$

式中, r 是对应的偏相关系数, n 是样本观测数, k 是可控制变量的数目, $n-k-2$ 是自由度,当 $t > t_{0.05}(n-k-2)$ 时即 $P < 0.05$, 拒绝原假设,相关性结果显著,当 $t > t_{0.01}(n-k-2)$ 时即 $P < 0.01$, 拒绝原假设,相关性结果极显著。 $t_{0.05}(n-k-2)$ 和 $t_{0.01}(n-k-2)$ 查阅 t 检验表确定。

2 结果与分析

2.1 2000—2015 年大湾区生态系统格局时空变化特征

从 2015 年粤港澳大湾区各类生态系统面积及分布来看,森林生态系统面积最大,约为 2.98 万 km^2 ,占大湾区陆地面积的 54.1%,主要分布在大湾区北部和西部的肇庆市、惠州市、江门市。其次是农田,占比 22.8%,主要分布在江门市、惠州市、广州市北部。湿地和草地面积最少,仅占 7.2% 和 2.2%。城镇面积约 0.75 万 km^2 ,占 13.6%,其中广州市、东莞市、佛山市的城镇面积最多,占大湾区城镇面积的一半(图 1、表 1)。

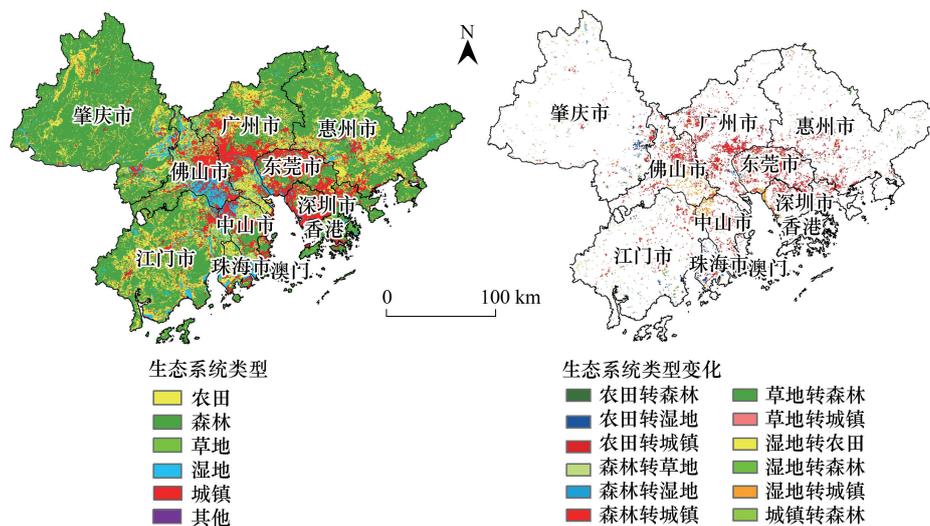


图 1 粤港澳大湾区 2015 年生态系统类型与 2000—2015 年类型变化空间分布

Fig.1 Spatial distribution of ecosystem types in 2015 and its variations in the GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

从 2000—2015 年大湾区各生态系统类型变化来看,城镇面积增加了 0.31 万 km^2 ,增幅达 68.6%,其中,中山市、东莞市和佛山市分别达到了 130%、99.5% 和 97.2%,广州市、惠州市增幅也超过了 70%,香港、澳门变化相对较小,分别约 3.8% 和 3.5%(表 2)。城镇增加的面积主要来源于农田,其次是森林、湿地。农田面积减少 0.19 万 km^2 ,减幅为 13.3%,广州市和东莞市减少面积最多,减幅最大的是东莞市(48%)和深圳市(30%)。森林面积减少了 803.25 km^2 ,减幅为 2.6%,其中,东莞市减幅较大,达到 29.5%。湿地减少了 6.7%,其中深圳市和中山市最明显。因此,近 15 年粤港澳大湾区由于快速城镇化导致森林、农田、湿地生态系统不断缩减、退化等问题突出。

2.2 2000—2015 年大湾区生态系统服务时空演化格局及特征

从大湾区生态系统生产力来看,多年平均植被 NPP 空间分布与生态系统类型分布一致,森林 NPP 最高,

平均约 419.4 gC/m², 草地 NPP 为 370.0 gC/m², 农田 NPP 约 323.5 gC/m², 湿地 NPP 约 181.0 gC/m² (图 2)。2000—2015 年, NPP 整体呈现轻度增加趋势, 其中, 湿地转森林、草地转森林、湿地转农田区域的 NPP 增加趋势最明显, 分别达到 6.5、5.9、4.9 gC m⁻² a⁻¹, 而农田转湿地、农田转城镇、森林转城镇区域的 NPP 呈现减少趋势, 分别为 -3.1、-0.8、-0.1 gC m⁻² a⁻¹ (图 2)。从各行政区看, 多年平均 NPP 值最高的是肇庆市和惠州市, 分别达到 413.7 gC/m² 和 405.4 gC/m², 最低的是澳门, 仅为 45.5 gC/m²; 就 NPP 总量而言同样是肇庆市和惠州市最高, 分别为 6.2 Tg 和 4.6 Tg, 两市 NPP 总量占大湾区 57%; 年际变化趋势最大的是江门市, 最小的是澳门和东莞市 (表 3)。

表 1 2015 年粤港澳大湾区各行政区生态系统类型面积及所占百分比

Table 1 Areas and proportions of various ecosystems in GHM Greater Bay Area in 2015

地区 Zone	城镇 Urban		森林 Forest		农田 Farmland		湿地 Wetland		草地 Grass		其他 Other	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%								
广州市	1412.01	19.69	3028.16	42.23	2156.74	30.07	472.42	6.59	97.90	1.37	4.21	0.06
深圳市	850.91	44.30	767.02	39.93	210.70	10.97	66.78	3.48	25.49	1.33	0.00	0.00
珠海市	344.97	22.58	488.14	31.95	436.95	28.60	242.79	15.89	6.54	0.43	8.38	0.55
佛山市	1090.50	28.75	847.43	22.34	932.41	24.58	910.09	23.99	10.75	0.28	2.07	0.05
江门市	707.59	7.64	4767.55	51.48	2726.94	29.45	729.53	7.88	325.47	3.51	3.50	0.04
肇庆市	408.33	2.74	11207.51	75.20	2411.19	16.18	573.78	3.85	301.43	2.02	0.51	0.00
惠州市	731.68	6.48	7237.58	64.13	2709.79	24.01	339.43	3.01	266.39	2.36	1.50	0.01
东莞市	1262.26	51.53	534.24	21.81	352.13	14.38	240.92	9.84	59.62	2.43	0.21	0.01
中山市	491.58	28.43	343.82	19.89	546.56	31.61	343.34	19.86	3.35	0.19	0.15	0.01
香港	196.94	18.47	620.26	58.17	57.47	5.39	39.37	3.69	152.24	14.28	0.04	0.00
澳门	14.79	63.64	6.29	27.07	0.00	0.00	2.16	9.29	0.00	0.00	0.00	0.00
合计 Total	7511.56	13.62	29848.00	54.14	12540.88	22.75	3960.61	7.18	1249.18	2.27	20.57	0.04

表 2 2000—2015 年粤港澳大湾区各类生态系统净变化面积及变化率

Table 2 Net change area and change rate of various ecosystems in GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

地区 Zone	城镇 Urban		森林 Forest		农田 Farmland		湿地 Wetland		草地 Grass	
	净变化 Net change area/km ²	变化率 Change rate/%								
广州市	594.38	72.70	-122.51	-3.89	-440.87	-16.97	-21.79	-4.41	-8.29	-7.81
深圳市	263.95	44.97	-103.66	-11.91	-90.32	-30.00	-37.25	-35.81	-6.88	-21.25
珠海市	125.97	57.52	-15.01	-2.98	-147.19	-25.20	61.86	34.19	-0.39	-5.63
佛山市	537.62	97.24	-61.45	-6.76	-286.05	-23.48	-187.35	-17.07	-1.57	-12.74
江门市	176.04	33.12	-62.42	-1.29	-127.04	-4.45	-4.24	-0.58	19.45	6.36
肇庆市	126.99	45.14	-82.25	-0.73	-152.95	-5.96	52.03	9.97	56.26	22.95
惠州市	315.70	75.89	-84.04	-1.15	-231.17	-7.86	3.84	1.14	0.85	0.32
东莞市	629.46	99.47	-223.06	-29.45	-325.92	-48.07	-54.28	-18.39	-22.75	-27.62
中山市	277.89	130.04	-53.65	-13.50	-119.05	-17.89	-95.38	-21.74	-1.07	-24.21
香港	7.16	3.77	4.84	0.79	-3.82	-6.23	-0.35	-0.88	-7.10	-4.46
澳门	0.50	3.50	-0.04	-0.63	0	0	-0.22	-9.24	0	0
合计 Total	3055.66	68.58	-803.25	-2.62	-1924.38	-13.30	-283.13	-6.67	28.51	2.34

从大湾区水源涵养服务来看, 森林、湿地、草地生态系统多年平均水源涵养总量约为 1.24×10^6 万 m³, 单位面积水源涵养量为 29.01 万 m³/km²。受降水分配格局和生态系统类型分布的影响, 水源涵养量呈现东南部沿海最高、北部次之、中部偏低的区域分异分布格局 (图 2)。其中, 香港的单位面积水源涵养量最高, 达 37.6 万 m³/km², 佛山市最低约 16.5 万 m³/km² (表 3)。2000—2015 年, 除肇庆市、江门市、佛山市西部和惠州市北

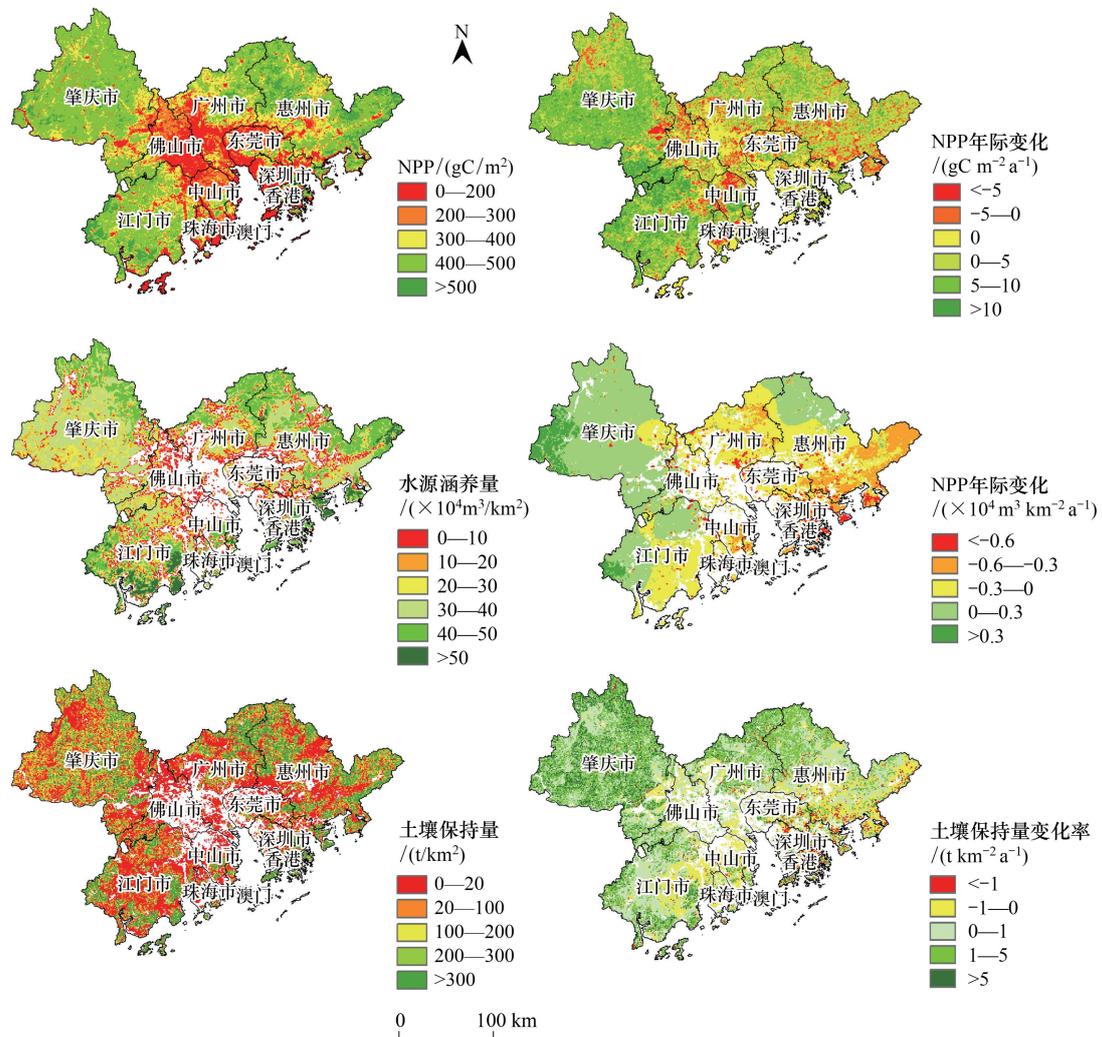


图2 2000—2015年粤港澳大湾区NPP、水源涵养量、土壤保持量多年平均值与年际变化趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of average annual and interannual trend of NPP, water conservation and soil conservation in the GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

部呈现增加趋势以外,其它区域皆呈现明显减少趋势,特别是东南部沿海的香港、深圳市、东莞市、中山市,水源涵养量年均减幅超过 $0.3 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$ (图2)。其中,森林转草地、湿地转森林区域的水源涵养量表现为微弱的增加趋势 ($0.12 \text{ 万 m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.04 \text{ 万 m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$),而农田、森林和草地转城镇区域的水源涵养量减少趋势较明显 ($-0.4 \text{ 万 m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.48 \text{ 万 m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.34 \text{ 万 m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

从大湾区土壤保持服务来看,多年平均土壤保持总量约为 $5.75 \times 10^8 \text{ t}$,单位面积土壤保持量为 $124.66 \text{ t}/\text{hm}^2$,亦呈现珠江入海口地区低周边地区高的空间分布格局(图2),佛山、东莞、中山等市的单位面积土壤保持量均小于 $100 \text{ t}/\text{hm}^2$,而香港、澳门、惠州则超过了 $150 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。2000—2015年,土壤保持年际变化整体呈现增加趋势(图2),特别是广州市和肇庆市,变化率分别达 $1.41 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $2.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,仅中山、东莞和香港的部分区域呈现轻微减少态势。其中,森林转草地和城镇转森林的区域土壤保持量呈现增加明显趋势 (2.15 、 $2.13 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),而森林转湿地、草地转城镇的区域呈现减少趋势。

2.3 生态系统服务的相关关系时空变化特征

2.3.1 相关关系的空间格局差异

2000—2015年,从粤港澳大湾区生态系统供给服务与水源涵养服务的相关关系来看,表现为显著或极显

著空间权衡关系的区域面积为 619 km², 约占大湾区陆地面积的 1.5%, 显著或极显著空间协同关系为 1680 km², 约占 4%, 而不显著的空间权衡和协同关系分别占 38.4% 和 53.4%, 还有 2.7% 显示为无相关关系。从空间分布来看, 在大湾区东北部散布显著的权衡关系, 而珠江口及大湾区西北部以协同关系为主, 特别是肇庆市、东莞市和深圳市部分区域表现为极显著正相关性(图 3)。从各行政区看, 广州市、惠州市和东莞市表现为显著或极显著权衡关系的面积占比最大, 分别占该市面积的 3.8%、3.0% 和 2.5%, 肇庆市、东莞市和深圳市表现为显著或极显著协同关系的面积占比最大, 分别为 9.1%、6.4% 和 6.1%(图 4)。

表 3 2000—2015 年粤港澳大湾区生态系统服务量及变化趋势统计

Table 3 Statistics of ecosystem services and its variations in GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

地区 Zone	NPP				水源涵养量 Water conservation		土壤保持量 Soil conservation	
	平均值 Mean/ (gC/m ²)	标准差 Standard deviation/ (gC/m ²)	总量 Total/Tg	年际变化趋势 Interannual trend/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	多年平均 Mean/ (10 ⁴ m ³ /km ²)	年际变化趋势 Interannual trend/ (10 ⁴ m ³ km ⁻² a ⁻¹)	多年平均 Mean/ (t/hm ²)	年际变化趋势 Interannual trend/ (t hm ⁻² a ⁻¹)
广州市	300.41	166.91	2.16	2.18	26.30	-0.18	114.82	1.41
深圳市	198.12	196.45	0.39	2.02	25.31	-0.43	119.38	0.40
珠海市	164.26	165.26	0.26	1.18	27.91	-0.27	100.59	0.57
佛山市	217.44	142.46	0.82	2.46	16.50	-0.17	51.64	0.75
江门市	373.27	143.13	3.47	5.57	30.23	-0.03	112.39	1.00
肇庆市	413.74	88.02	6.16	5.48	30.22	0.13	128.13	2.52
惠州市	405.44	118.67	4.58	2.21	31.79	-0.16	154.03	0.53
东莞市	178.43	158.88	0.44	0.41	16.96	-0.35	78.90	0.34
中山市	220.73	136.07	0.38	1.28	26.01	-0.37	71.72	0.16
香港	209.52	216.60	0.23	1.97	37.55	-0.50	230.28	0.32
澳门	45.46	109.91	0.00	0.69			154.92	-0.17
合计 Total	341.76	149.31	18.88	3.52	29.01	-0.07	124.66	1.34

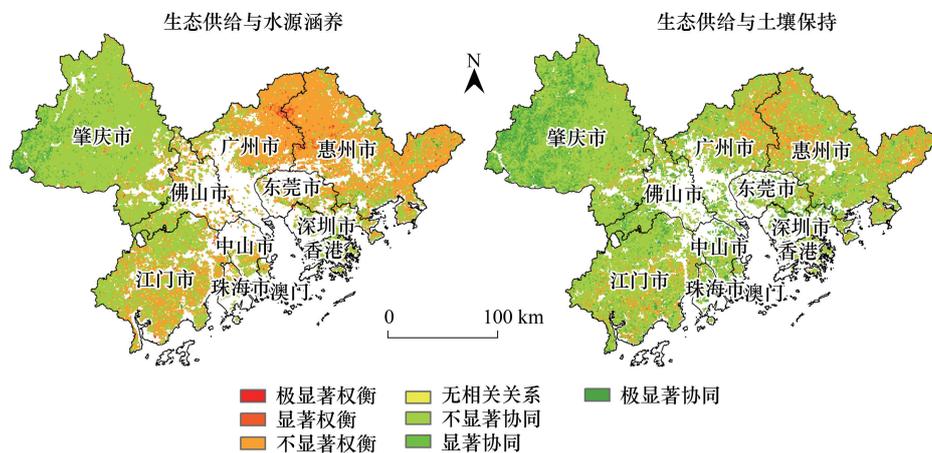


图 3 2000—2015 年粤港澳大湾区生态系统供给与水源涵养、土壤保持服务的相关关系空间差异

Fig. 3 Spatial correlations between ecosystem supply services and water conservation, soil conservation in the GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

从大湾区生态系统供给和土壤保持服务的相关关系来看, 表现为显著或极显著权衡关系的面积为 81 km², 约占 0.2%, 显著或极显著协同关系的为 8011 km², 约占 18.6%, 不显著的空间权衡和协同关系分别占 14.1% 和 65.4%, 还有 1.7% 显示为无相关关系。相当一部分区域表现为显著的正相关性, 特别是肇庆市、广州市北部、中山市, 而大湾区南部和东北部的江门市、惠州市等区域则呈现不同程度的空间权衡关系, 主要城镇

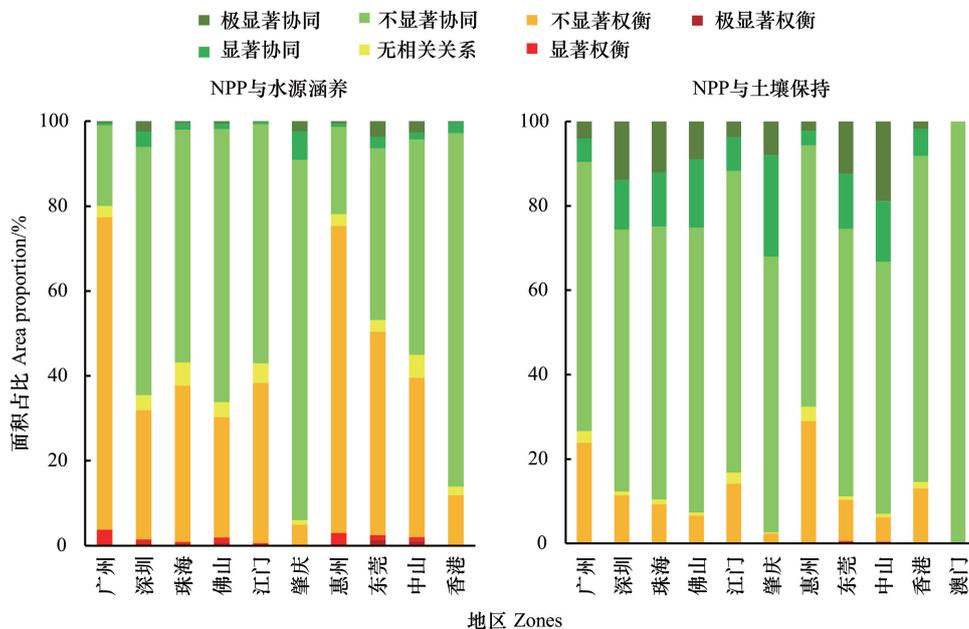


图4 2000—2015年粤港澳大湾区各行政区生态系统供给与水源涵养、土壤保持服务的权衡与协同关系面积占比

Fig.4 Area proportion of trade-offs and synergies between ecosystem supply services and water conservation, soil conservation in GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

周边的供给服务和土壤保持服务以显著正相关性为主,即显著空间协同关系(图3)。从各行政区看,东莞市和中山市表现为显著或极显著权衡关系的面积分别占该市面积的0.6%和0.5%,中山市和肇庆市表现为显著或极显著协同关系的面积占比分别为33.3%和32.0%(图4)。

2.3.2 相关关系的时间过程变化

从2000—2015年大湾区各行政区供给与调节服务之间关系的时间过程变化来看(图5,图6),总体以不同程度的协同关系为主,期间部分时间段可能呈现不同程度的权衡关系。从图5可知,2009—2011年广州市的NPP先减少后增加而水源涵养量表现为先增加后减少,2003—2006年中山市的NPP先增加后减少而水源涵养量表现为先减少后增加;从图6可知,2012—2014年江门市的NPP先减少后增加而土壤保持量表现为先增加后减少。

从2000—2015年粤港澳大湾区整体的生态系统供给和调节服务相关系数可以看出(图7),总体呈现波动中缓慢增长的趋势,特别是2005—2007年的波动最为明显。在大湾区城市群发展过程中,需要针对不同区域开展有针对性的生态保护措施,特别是权衡关系显著的广州市、佛山市、惠州市、江门市等,其中有些区域作为大湾区城市群最重要的水源涵养、水土保持生态屏障区,需要在实施生态保护时注意关键生态系统服务的排序和权衡考虑。

3 讨论

城镇化是粤港澳大湾区生态系统类型和生态系统服务变化的重要原因。大湾区近几十年发展迅速,据统计,2000—2018年,大湾区GDP总量从2.4万亿元增长到10.9万亿元,常住人口数从4956万增长至7116万人,分别增长了362%和44%,人口和经济迅速增长的同时,城镇、建设用地扩张不断占用农田、森林和湿地,人类活动也影响着生态系统格局及其服务潜力。研究表明,近30年受围填海活动的影响,大湾区围垦面积达59422 hm^2 ,围垦利用形式也从农田、养殖塘用地转变为城市扩张,过度围垦严重影响滨海湿地净化污染、保滩护岸等生态功能^[50],大湾区沿岸咸水沼泽和红树林遭到破坏,进而影响水源涵养功能,这与本文关于水源涵养量在深圳、东莞、中山等沿海城市减少较多的分析结果是契合的。NPP和土壤保持量在许多区域呈现轻度

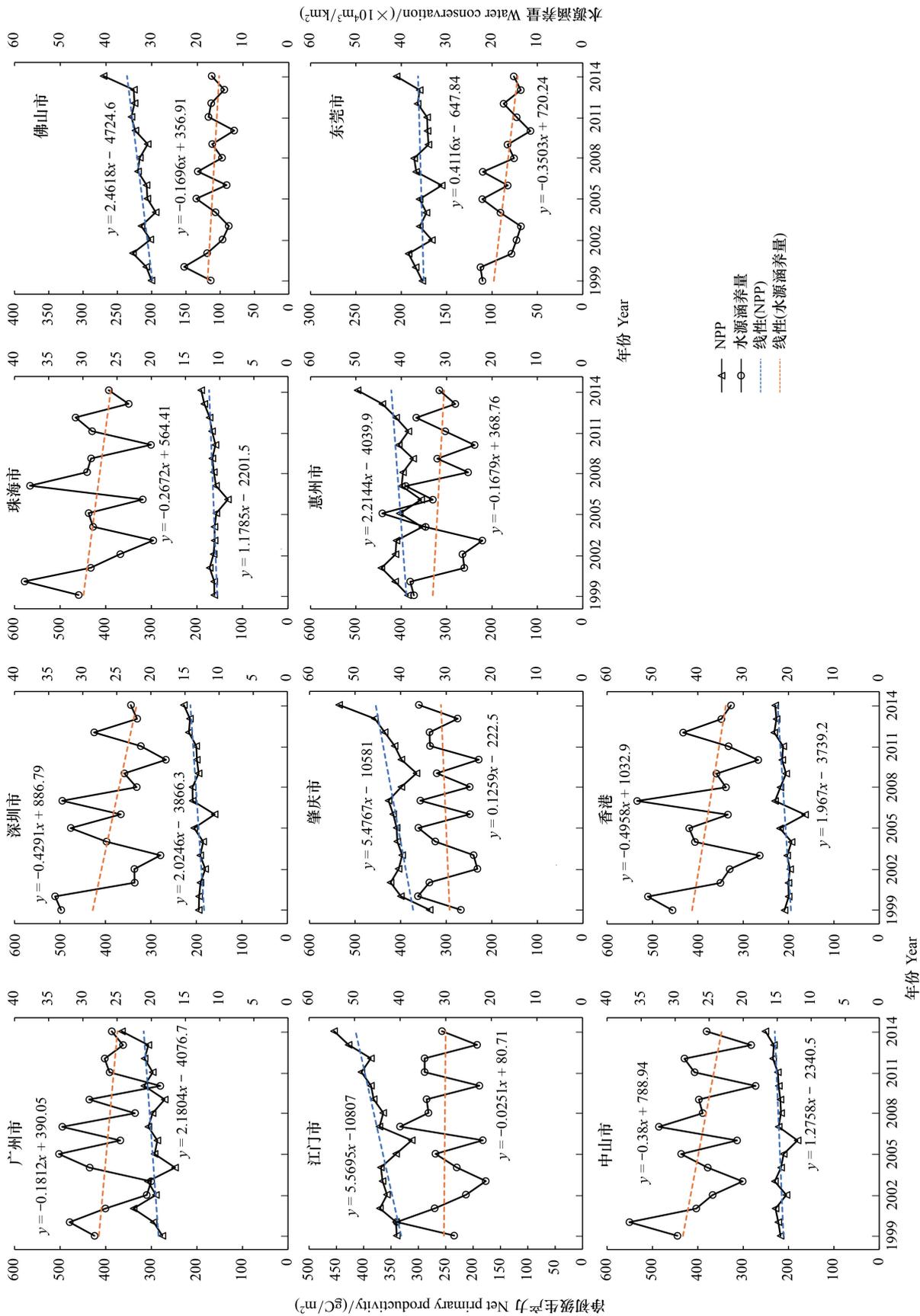


图5 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统供给与水源涵养服务的权衡与协同关系年际变化
Fig.5 The temporal changes of trade-offs and synergies between ecosystem supply services and water conservation in GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

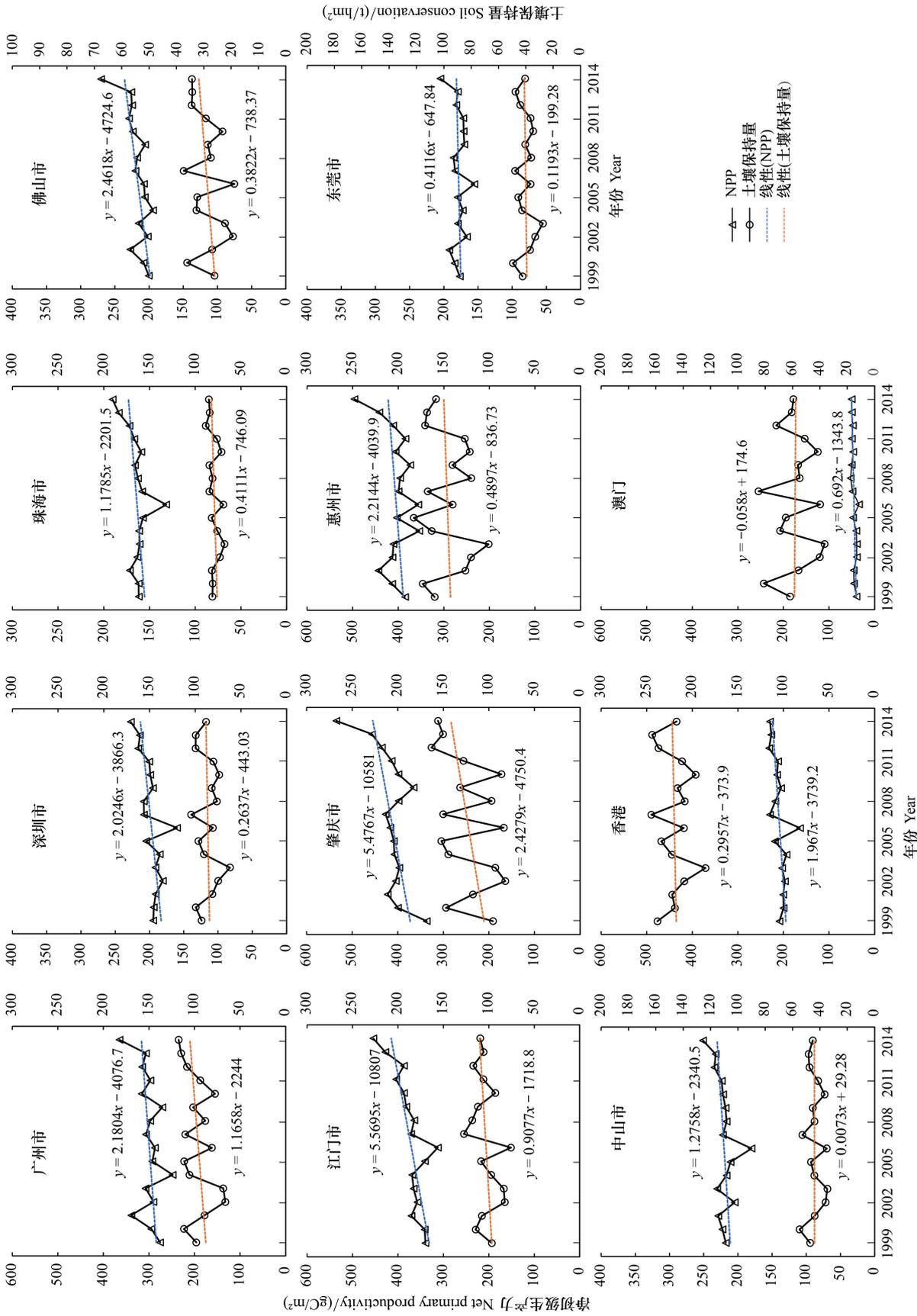


图6 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统供给与土壤保持服务的权衡与协同关系年际变化
Fig.6 The temporal changes of trade-offs and synergies between ecosystem supply services and soil conservation in GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

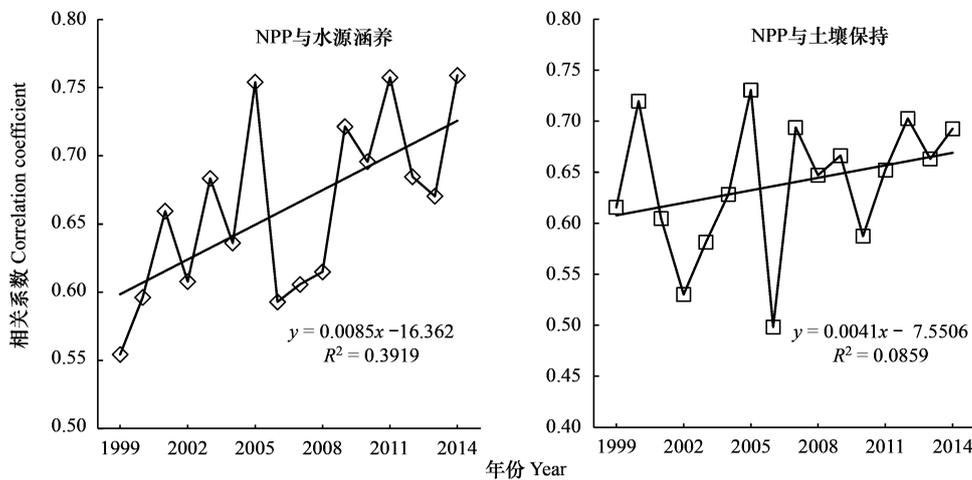


图7 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统供给与水源涵养、土壤保持服务的相关系数年际变化

Fig.7 The temporal changes of correlation coefficient between ecosystem supply services and water conservation, soil conservation in counties of GHM Greater Bay Area from 2000 to 2015

增加趋势,原因可能是退耕还林还草、天然林保护等森林保护修复政策的实施,较多农田转为森林,同时与其他生态系统类型相比,森林单位面积土壤保持量和净初级生产力都较高。

过去几十年,我国城市群地区高速发展,秉持着以发展为主线的理念,出现了许多摊大饼的土地城市化、人口城市化现象^[51],以致整体生态空间的丧失以及城市区域生态环境恶化^[52],难以形成可持续的城市化发展进程。因此,国土空间规划、新型城镇化规划等最新举措皆将经济社会发展与生态环境保护并举提到首要高度。粤港澳大湾区作为我国开放程度最高、经济活力最强的区域,规划建设成为更具活力的经济区、宜居宜业宜游的优质生活圈^[34]。通过掌握大湾区生态系统格局与服务过去发展的时空演化态势,可以看出城市化挤占生态空间导致的生产力供给、水源涵养等生态系统服务能力下降,得出了作为大湾区生态服务主要供给区域的东北部和南部地区存在生态系统供给与调节服务的权衡关系,这些都将成为大湾区未来发展的负面因素。因此,生态保护、环境优化必须放在与城市发展、经济开发同等重要地位,明确界定生产、生活、生态空间,明确划分生态红线、耕地保护红线和城市发展界线,实行最严格的生态环境保护制度,才可能建设生态安全、环境优美、社会安定、文化繁荣的美丽湾区。有关部门需要制定针对性的政策,减少城镇扩张和不合理的人类活动对生态系统服务的消极影响。对于城镇化水平较高的港、澳、广、深,可以从优化绿地结构比如屋顶绿化等措施改善生态环境。而生态服务主要提供区域的肇庆、惠州、江门等,应兼顾推进大湾区自然保护地和游憩生态空间建设,构筑湾区生态屏障。

本文的不确定性和不足主要表现在几个方面:(1)文中生态系统类型数据空间分辨率虽为100 m,但估算生态系统服务的NPP、植被覆盖度、降水量等遥感或插值数据空间分辨率则以1 km为主,因此估算结果对于城市内部不具有解释依据。(2)MODIS的NPP数据产品用于年际趋势分析结果可信度较高,但是在数据绝对值方面精度不够,然而目前暂未有更高精度的NPP数据集,未来需要针对该区域供给服务开展针对性估算或模拟研究。(3)学界对于水源涵养尚未形成一致认识,文中采用简单的降水储存量法,基于本地化参数估算生态系统水源涵养量,实质上是生态系统通过截流延长降水转化为径流的能力,即水量调节。(4)为了提高生态系统土壤保持服务量的估算精度,需要进一步结合地面调查对土壤侵蚀方程中的管理因子进行参数本地化。(5)大湾区城镇化导致森林、农田等自然生态系统面积锐减,进而导致生态系统服务能力下降,但是通过景观格局优化、合理开发可以有效止损^[53-54],因此可以考虑从景观格局的角度进行研究,结合景观格局指数,探讨如何最大限度地提高协同、尽量减少权衡。(6)城镇化是粤港澳大湾区近十几年变化最显著的特点,研究城市群地区生态系统服务还需要综合考虑文化服务等^[32,55],在空间上对多个服务进行综合评价

及权衡,为大湾区生态修复与管理提供决策支持。

此外,生态系统服务权衡与协同的分析方法有很多,主要包括相关分析、双变量空间自相关分析、权衡协同度模型等^[56],本研究是基于连续 16 年数据进行相关性分析而非只把两年数据相减,能较为准确和直观地揭示大湾区生态系统供给和调节服务的权衡协同关系。其中 NPP 与土壤保持为相互增益的协同关系,这与一些学者的研究结果是一致的^[57]。下一步,需要进一步通过创建渔网把研究区格网化后再进行生态系统服务之间的相关分析。

4 结论

通过分析 2000—2015 年粤港澳大湾区生态系统宏观格局、供给、水源涵养、土壤保持服务的时空演化特征,探讨了生态系统供给与主要调节服务之间的权衡与协同关系,我们可以看出,分布在北部和西部的森林是大湾区提供生态服务的主体生态系统,其次为湿地和农田。NPP 和土壤保持量整体上均呈现轻度增加趋势,特别是大湾区江门、肇庆等生态服务的主要提供区域;东南部最高、北部次之、中部偏低的水源涵养量,除西北部呈现增加趋势以外,其它区域皆呈现减少趋势。近十几年,受城市化影响,森林、农田、湿地等生态空间面积皆呈现减少态势,生态系统供给、调节服务量在农田、森林、草地转城镇的区域呈现明显的减少趋势。大湾区生态系统供给与水源涵养、土壤保持服务均以协同关系为主,而在大湾区东北部、南部权衡关系明显。因此,针对供给与调节服务表现为权衡的区域,在大湾区发展过程中需要特别注意有针对性的生态保护修复措施。

参考文献 (References):

- [1] 刘璐璐,曹巍,吴丹,黄麟.国家重点生态功能区生态系统服务时空格局及其变化特征.地理科学,2018,38(9):1508-1515.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Volume 2 Scenarios: Findings of the Scenarios Working Group. Washington DC: Island Press, 2005.
- [3] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞.中国生态系统服务的价值.资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [4] 欧阳志云,郑华,岳平.建立我国生态补偿机制的思路与措施.生态学报,2013,33(3):686-692.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李文华.生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用.北京:中国人民大学出版社,2008.
- [10] 毛齐正,黄甘霖,邹建国.城市生态系统服务研究综述.应用生态学报,2015,26(4):1023-1033.
- [11] 李双成,张才玉,刘金龙,朱文博,马程,王珏.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题.地理研究,2013,32(8):1379-1390.
- [12] 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.
- [13] 李晓炜,侯西勇,邸向红,苏红帆.从生态系统服务角度探究土地利用变化引起的生态失衡——以莱州湾海岸带为例.地理科学,2016,36(8):1197-1204.
- [14] 曾杰,李江凤,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.
- [15] 荣益,李超,许策,严岩.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.
- [16] 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.
- [17] 陈星,周成虎.生态安全:国内外研究综述.地理科学进展,2005,24(6):8-20.
- [18] 俞孔坚,王思思,李迪华,乔青.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.
- [19] 欧阳晓,朱翔,贺清云.城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例.生态学报,2019,39(20):7502-7513.
- [20] Breuste J, Qureshi S. Urban sustainability, urban ecology and the Society for Urban Ecology (SURE). Urban Ecosystems, 2011, 14(3): 313-317.
- [21] Breuste J, Qureshi S, Li J X. Applied urban ecology for sustainable urban environment. Urban Ecosystems, 2013, 16(4): 675-680.
- [22] Taylor L, Hochuli D F. Creating better cities: how biodiversity and ecosystem functioning enhance urban residents' wellbeing. Urban Ecosystems, 2015, 18(3): 747-762.
- [23] 王保盛,陈华香,董政,祝薇,邱全毅,唐立娜.2030年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响.生态学报,2020,

- 40(2): 484-498.
- [24] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 邓越. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [25] 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.
- [26] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变. 生态学报, 2011, 31(20): 6194-6203.
- [27] 杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 郑子豪. 粤港澳大湾区建设用地扩张与城市热岛扩张耦合态势研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1592-1603.
- [28] 李郁, 周金苗, 黄耀福, 黄玫瑜. 从巨型城市区域视角审视粤港澳大湾区空间结构. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1609-1622.
- [29] 冯珊珊, 樊风雷. 基于不透水面的粤港澳大湾区景观格局时空变化. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2907-2914.
- [30] 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.
- [31] 王玉明. 粤港澳大湾区环境治理合作的回顾与展望. 哈尔滨工业大学学报: 社会科学版, 2018, 20(1): 117-126.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 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.
- [36] 闫慧敏, 甄霖, 李凤英, 杜秉贞, 潘理虎, 向芹, 陈伟娜. 生态系统生产力供给服务合理消耗度量方法——以内蒙古草地样带为例. 资源科学, 2012, 34(6): 998-1006.
- [37] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [38] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
- [39] 陈智. 2000—2015 年中国东北森林生产力和碳素利用率的时空变异. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1625-1632.
- [40] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(2): 144-155.
- [41] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luysaert S, Margolis H, Oleson K W, Rouspard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Ian Woodward F, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [42] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽. 青藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. 自然资源学报, 2016, 31(4): 543-555.
- [43] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 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.
- [44] 吴丹. 中国主要陆地生态系统水源涵养服务研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [45] 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.
- [46] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [47] McCool D K, Brown L G, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [48] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [49] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [50] 吴文挺, 田波, 周云轩, 舒敏彦, 戚纤云, 胥为. 中国海岸带围垦遥感分析. 生态学报, 2016, 36(16): 5007-5016.
- [51] 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.
- [52] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈利顶, 李双成. 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [57] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 赵胜男. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析. 地理研究, 2017, 36(3): 592-602.