

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.037.

朱俊俊, 高周冰, 王君櫚, 等. 南京都市圈生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 383-394.

ZHU Junjun, GAO Zhoubing, WANG Junxiao, et al. Spatiotemporal Changes and Trade-off/Synergy Relationship of Ecosystem Services in Nanjing Metropolitan Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 383-394.

南京都市圈生态系统服务时空变化及权衡协同关系

朱俊俊^{1,2}, 高周冰^{1,2}, 王君櫚^{1,2}, 廖凯华³, 吕立刚^{1,2}

(1.南京财经大学 公共管理学院, 南京 210023; 2.自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210017; 3.中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: [目的]全面理解生态系统服务的时空格局特征及其相互关系,可以丰富生态系统服务及可持续发展等相关理论,并对区域生态环境管理政策的制定具有重要指导意义。[方法]以南京都市圈为研究区,在评估2000—2020年的产水、粮食供给、土壤保持和碳固持等4种生态系统服务的基础上,分析各类型生态系统服务能力在地类和区域上的差异;通过识别生态系统服务热点区及其热点服务类型,评估不同区域服务供给能力;进而采用相关系数和差异比较等方法探究南京都市圈生态系统服务静态与动态的权衡/协同关系。[结果]2000年、2010年、2020年,南京都市圈的产水量、粮食产量、土壤保持量及碳固持量的三年平均值分别为522.12 mm, 4.20 t/hm², 42.61 t/hm², 44.57 t/hm², 除碳固持服务逐年下降,其他服务均呈逐年递增趋势。受土地利用类型和区域自然环境的作用,产水、土壤保持和碳固持服务呈南高北低的空间分布,粮食供给服务则呈南低北高的空间格局。由北向南依次形成了以粮食供给服务为主的1重服务热点区、以产水和粮食供给服务为主的2重服务热点区以及以产水、土壤保持和碳固持服务为主的3重服务热点区。采用静态和动态两种方法得到的权衡/协同结果有所不同。[结论]在编制南京都市圈国土空间规划和国土空间生态修复的工作中应该重点考虑不同生态系统服务的时空变化及其相互关系,降低不同服务之间的权衡程度,以达到生态效益最大化。

关键词: 生态系统服务; InVEST模型; 权衡/协同关系; 时空变化; 南京都市圈

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0383-12

Spatiotemporal Changes and Trade-off/Synergy Relationship of Ecosystem Services in Nanjing Metropolitan Area

ZHU Junjun^{1,2}, GAO Zhoubing^{1,2}, WANG Junxiao^{1,2}, LIAO Kaihua³, LYU Ligang^{1,2}

(1.School of Public Administration, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;
2.Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210017, China;
3.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: [Objective] A comprehensive understanding of the characteristics of spatiotemporal patterns of ecosystem services and their interrelationships can enrich theories related to ecosystem services and sustainable development, and provide important guidance for the formulation of regional ecological and environmental management policies. [Methods] Taking the Nanjing metropolitan area as the study area, we analyzed the differences of the capacity of each type of ecosystem service in land use types and regions based on the assessment of four types of ecosystem services from 2000 to 2020, including water production, food supply, soil conservation and carbon sequestration, assessed the capacity of service provisioning in different regions by identifying ecosystem service hotspots and their service types, and explored the static and dynamic trade-

收稿日期: 2022-03-01

修回日期: 2022-05-03

资助项目: 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX22_1737); 国家自然科学基金项目(41801169); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2019CZEPK06)

第一作者: 朱俊俊(1999—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务与国土空间修复研究。E-mail: 3514676171@qq.com

通信作者: 吕立刚(1984—), 男, 甘肃宁县人, 博士, 副教授, 主要从事国土空间规划、耕地资源保护与粮食安全研究。E-mail: liganglv@nufe.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

offs/synergies between ecosystem services in Nanjing Metropolitan Area by using correlation analysis. [Results] In the years 2000, 2010 and 2020, the three-year average amounts of water production, food production, soil conservation and carbon sequestration in the Nanjing Metropolitan Area were 522.12 mm, 4.20 t/hm², 42.61 t/hm² and 44.57 t/hm², respectively, with all services increasing year by year except for carbon sequestration. The spatial distributions of water production, soil conservation and carbon sequestration services were relatively high in the south and low in the north, while that of food supply service was low in the south and high in the north, depending on the type of land use and the natural environment of the region. From north to south, a 1-fold service hotspot with food supply services, a 2-fold service hotspot with water production and food supply services, and a 3-fold service hotspot with water production, soil conservation and carbon sequestration services were formed in turn. The trade-off/synergy results obtained by using the static and dynamic approaches were different. [Conclusion] In the work of territorial spatial planning and ecological restoration of the Nanjing Metropolitan Area, the spatiotemporal changes of different ecosystem services and their relationships should be considered to reduce the trade-off between different services and maximize ecological benefits.

Keywords: ecosystem services; InVEST model; trade-off/synergy relationship; spatiotemporal changes; Nanjing Metropolitan Area

生态系统服务(Ecosystem Services)是生态系统所提供的用于维持人类生存发展的环境条件与效用,是人类直接或间接从生态系统中获得的各种产品与惠益^[1-3]。近几十年来,全球城镇化发展迅速,大规模的城市建筑物正在蚕食生态空间,对生态环境造成严重破坏^[4]。2019年,生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)发布的全球生物多样性和生态系统服务评估报告显示,18类生态系统服务中有14类自1970年以来下降显著^[5]。而这种现象在发展中国家则更加普遍,例如1978—2020年,中国的常住人口城镇化率从17.92%上升至63.89%,快速城镇化导致了城镇空间不断扩大,农业和生态空间的不断萎缩,打破了区域间生态系统服务的供需平衡,由此引发大气和水体污染、水土流失以及自然灾害频现等一系列环境问题,最终限制和阻碍了人类的可持续发展^[5-8]。因此,深入刻画生态系统服务的时空变化特征,厘清生态系统服务的权衡/协同关系,可以丰富生态系统服务及可持续发展等相关理论,并对区域生态环境管理政策的制定具有重要的指导意义^[9-11]。

目前,国内外学者针对生态系统服务的时空变化及其相互关系已经展开了较为广泛的研究,同时也取得了丰硕的成果^[12-13]。在生态系统服务权衡/协同关系的内涵方面,Rodríguez等^[14]、Bennett等^[15]、Haase等^[16]、Lester等^[17]及彭建等^[18]分别从生态系统服务的一对一、一对多以及多对多等对应关系角度发展和完善了权衡/协同的概念。在识别生态系统服务权衡/协同关系的测度方法方面,Pan等^[19]、Geng等^[20]、Bradford等^[21]、Niu等^[22]及刘海等^[23]分别使用相关分析

法、均方根偏差法、双变量空间自相关以及权衡协同度等单一方法探究了流域、森林以及水源地等区域的权衡/协同关系;而Vallet等^[24]在探究哥斯达黎加Reventazón流域生态系统服务关系时却发现不同测度方法得到的生态系统服务关系的性质和强度不同^[25];因此,选择合适的方法对精确测度区域生态系统服务的权衡/协同关系至关重要。在生态系统服务权衡/协同关系的研究内容方面,较多学者研究了退耕还林还草工程^[26]、生态补偿^[27]、生态恢复措施^[28]以及不同的空间尺度^[29]等对生态系统服务权衡/协同关系的影响^[25];Peng等^[30]、Qiu等^[31]和林媚珍等^[2]学者分别研究了生态系统服务对城市化的阈值响应、生态系统服务的驱动因素以及情景模拟预测;此外部分学者^[13,32]引入玫瑰图来分析不同土地利用类型上生态系统服务供给能力的差异。综上所述,在研究方法上,现有研究大多使用单一方法来测度生态系统服务的权衡/协同关系,较少关注不同方法的差异及适用性;在研究内容上,现有研究比较了不同土地利用类型上生态系统服务的差异,但较少关注同种土地利用类型提供生态系统服务能力的区域差异性;此外,在研究区域上,现有研究主要涉及流域、生态脆弱区及城市群,而评估都市圈的研究较少。都市圈和城市群作为大城市区域化发展到不同阶段的产物,其城镇规模存在较大差异,一般来说,城市群的规模相当于数个都市圈,而不同的城镇化速度和规模对生态系统服务产生的影响存在明显差异^[33]。因此,在都市圈尺度,开展生态系统服务变化及权衡/协同关系研究对于完善不同空间尺度城镇化对生态系服务的影响研究具有非常重要的科学意义。

南京都市圈作为我国第一个正式批复的跨省都市圈,从建设构想的提出至发展规划的批准经历了 20 多年。2000 年 7 月,江苏省提出建设以省会南京为中心的南京都市圈;2003 年 1 月,江苏省政府批准《南京都市圈规划(2002—2020 年)》;2021 年 2 月,国家发展和改革委员会同意《南京都市圈发展规划》,标志着南京都市圈在促进中心城市与周边城市同城化发展方面取得了较好的进展。然而,由于城镇化过程中片面追求经济效益,盲目扩大城镇用地规模,对区域的生态环境造成了一定的破坏。尤其是南京都市圈作为长江中下游沿江城市地带的核心区域,其城镇化推进与长江流域的生态环境保护息息相关。在习近平总书记对于长江经济带发展要“共抓大保护,不搞大开发”的重要指示下,保护长江沿线及周边区域的生态环境刻不容缓。因此,本研究以南京都市圈为研究区,基于 InVEST 模型评估 2000—2020 年的产水、粮食供给、土壤保持和碳固持等 4 种生态系统服务的时空变化,分析生态系统服务能力在地类和区域上的差异;通过识别生态系统服务热点区及其热点服务类型,评估不同区域服务供给能力;综合使用相关系数法和差异比较法来探究南京都市圈静态与动态的权衡/协同关系,以为南京都市圈国土空间规划编制和生态系统修复工作提供科学决策支撑,同时还可为跨省级区域的生态系统服务研究及相关生态环境管理政策的制定提供参考。

1 研究区概况

南京都市圈(117°09′—119°58′E,29°57′—34°06′N)是以江苏省南京市为中心的经济区域带,位于中国东部、长江中下游沿江城市地带核心地区,地跨苏皖两省,南接浙江省,是长三角城市群的重要组成部分,是连通东部中部两大板块、衔接长江淮河两大流域的枢纽区域,也是中国第一个规划建设跨省都市圈(图 1),具有重要的战略地位。根据《南京都市圈发展规划》(2021),南京都市圈的规划范围包括南京、镇江、扬州、淮安、芜湖、马鞍山、滁州和宣城等 8 市的全域以及常州市的金坛区和溧阳市。其地貌类型以平原和丘陵为主;气候主要为亚热带季风气候和亚热带湿润季风气候,四季分明,雨量充沛,年平均降雨量达到 1 000 mm 以上。2020 年末,常住人口约 3 531.76 万人,其中城镇常住人口约 2 592.81 万人,常住人口城镇化率约 73.41%,高于全国平均水平(63.89%)。地区生产总值约 41 750.78 亿元,其中第一、二、三产业占比分别为 4.67%,42.45%和 52.88%。都市圈总面积约 6.6 万 km²,其中耕地、林地、草地、水域和人造地表等主要

地类的面积占比分别为 59.48%,16.38%,1.97%,9.24%和 12.47%,而湿地和裸地等其他地类占比约 0.46%。尽管南京都市圈生态环境本底较好,但近年来快速城镇化和工业化发展对生态环境造成了一定程度破坏,例如存在空气污染、水体质量恶化、耕地面积减少、植被覆盖率降低等问题^[4,6,7]。因此,如何协调经济发展与生态环境保护的矛盾冲突,科学推进生态保护修复和环境污染治理,打造绿色都市圈成为当前该区域亟需解决的问题之一。

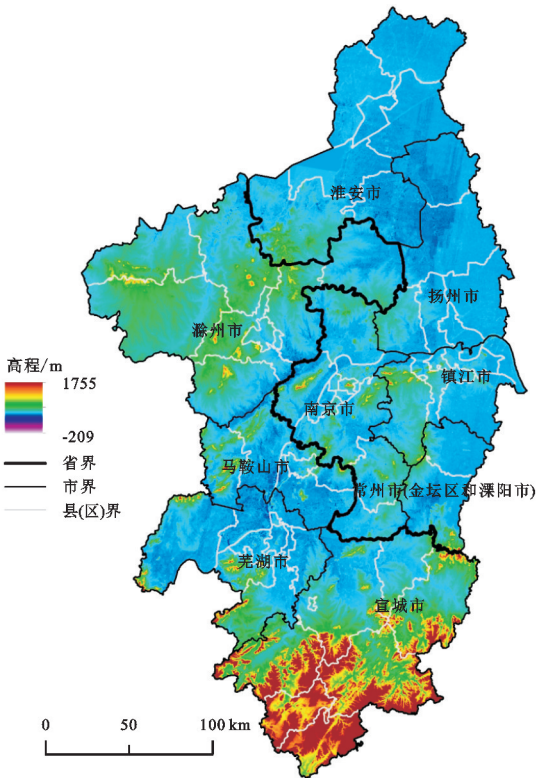


图 1 研究区位置

2 数据来源与处理

本研究所采用的主要数据包括土地利用、气象、DEM,NDVI 以及粮食产量等数据:(1) 2000 年、2010 年和 2020 年 3 期土地利用数据(30 m 空间分辨率),来自于中国研制的全球地表覆盖数据(GlobeLand30),该数据共包括 10 个一级类型,其中南京都市圈范围内涉及耕地、林地、草地、湿地、水体、人造地表和裸地等 7 种类型。(2) 降雨量和潜在蒸散发等气象数据,来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—地理资源分中心(<http://gre.geodata.cn>)。(3) ASTER GDEM 30 M 分辨率数字高程(DEM)数据,来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。(4) NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。(5) 粮食产量等统计数据来源于中国统计年鉴、江苏省统计年鉴、安徽省统计年鉴以

及南京都市圈各地级市统计年鉴。所有空间数据的坐标系统统一为 WGS_1984_UTM_zone_50 N, 空间分辨率为 30 m。

3 研究方法

3.1 生态系统服务选择与量化估算

生态系统服务类型多样,整体上可以划分为 4 大类,即供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[34]。结合数据的可获取性与研究区实际情况,本研究选择 4 种典型的生态系统服务,即产水服务(WY)、粮食供给服务(FP)、土壤保持服务(SR)和碳固持服务(CS)。选取依据为:(1)产水、粮食供给、土壤保持和碳固持等作为研究区关键的 4 种生态系统服务,从属于供给服务、调节服务和支持服务 3 个大类,因此评估类型更加全面。(2)产水服务直接惠及人民,且与社会生产及居民生活用水等方面密切相关^[35]。因此,评估产水服务对改善水资源管理具有重要意义^[35]。(3)粮食是维持人类生存的必需品,然而都市圈内城镇化扩张与耕地保护的矛盾突出,因此评估粮食供给水平对于维护区域粮食安全具有重要作用。(4)大运河和长江等水系统流经南京都市圈的部分区域,因此评估土壤保持能力的变化对维持区域生态系统自身稳定性具有重要作用。(5)目前,碳达峰和碳中和已成为我国转型发展的重要挑战和机遇,因此,评估碳固持量的变化对于区域碳中和的推进具有重要的现实意义。(6)产水、粮食供给、土壤保持和碳固持等 4 种服务较多的应用在以城市为中心的生态系统服务相关研究中^[30]。

3.1.1 产水服务 采用 InVEST 模型中的产水评估模块(Wateryield)来量化南京都市圈的产水服务,其主要公式如下所示^[36-37]:

$$WY_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_x}{P_x} \right)^{w_x} \right]^{1/w_x} \quad (2)$$

$$PET_x = Kc_x \times ET_{O_x} \quad (3)$$

$$w_x = \frac{AWC_x \times Z}{P_x} + 1.25 \quad (4)$$

式中: WY_x 为栅格单元 x 的年产水量; P_x 为栅格单元 x 的年降水量; AET_x 为栅格单元 x 的年实际蒸散量; PET_x 为栅格单元 x 的年潜在蒸散量; ET_{O_x} 为栅格单元 x 的参考植被蒸散量; Kc_x 为作物蒸散发系数; AWC_x 为植物可利用含水量; w_x 为经验参数; Z 为季节常数,根据南京都市圈各地级市水资源公报的水资源总量进行验证^[38],最终取值为 4.06。

3.1.2 粮食供给服务 相关研究发现^[39-40],农作物与 NDVI 之间具有显著的线性关系,通过 NDVI 便大致可以反应农作物产量水平。因此,本研究借助 NDVI 数据,将南京都市圈的粮食产量分配到耕地上,计算公式如下所示^[32,41,42,43]:

$$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum} \quad (5)$$

式中: G_i 为第 i 个耕地栅格所分配的粮食产量; G_{sum} 为南京都市圈粮食总产量; $NDVI_i$ 为第 i 个耕地栅格的 NDVI; $NDVI_{sum}$ 为南京都市圈耕地的总 NDVI。

3.1.3 土壤保持服务 通过 InVEST 模型中的沉积物保留模块(Sediment Retention)来量化南京都市圈的土壤保持服务,计算公式如下^[36,44]:

$$RKLS = R \times K \times L \times S \quad (6)$$

$$USLE = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (7)$$

$$sed_retention = (RKLS - USLE) + ups_retention \quad (8)$$

式中: $RKLS$ 为潜在土壤侵蚀量; $USLE$ 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子,参考生产建设项目土壤流失量测算导则(SL773-2018); L, S 分别为坡长和坡度因子; C 为覆盖和管理因子; P 为土壤保持措施因子; $ups_retention$ 为地块拦截上游地块(不包括地块自身)的沉积物量; $sed_retention$ 为地块沉积物保留量。

3.1.4 碳固持服务 采用 InVEST 模型中的碳固持模块(Carbon Storage)来量化南京都市圈的碳固持服务,模型所需的碳库数据为经验数据,本研究借助以往研究成果来确定不同地类的碳库参数^[45-46]。计算公式如下所示^[47-48]:

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (9)$$

式中: C_{tot} 为碳固持总量; C_{above} 为地上生物的碳固持量; C_{below} 为地下生物的碳固持量; C_{soil} 为土壤中的碳固持量; C_{dead} 为死亡有机物中的碳固持量。

3.2 生态系统服务热点区及其热点服务识别

在栅格单元上,若某种生态系统服务的值大于研究区该种生态系统服务的平均值^[32],则称此栅格单元为该种服务的热点区,否则称为非热点区,同时称这种服务为该栅格单元的热点服务。然后由此判断栅格单元上所有生态系统服务的热点区情况,最终得到多重生态系统服务热点区,即该栅格单元属于几种服务的热点区便称其为几重生态系统服务热点区。多重生态系统服务热点区从整体上展示了区域热点区的数量,而热点服务可以清楚地表达出热点区中具体的生态系统服务类型。二者互为补充,充分揭示了

区域生态系统服务的综合情况以及不同服务供给能力的强弱程度。

3.3 生态系统服务权衡与协同关系测度

(1) 静态权衡/协同分析法。在 ArcGIS 10.3 中按照点距不小于栅格大小(30 m)的原则生成随机点,删除无效点数后共得到样本点 26 477 个。使用皮尔逊相关系数法分别计算南京都市圈每两种生态系统服务之间的相关系数,当相关系数为正值且通过显著性检验时则代表其具有显著的协同关系,当相关系数为负值且通过显著性检验时则代表其具有显著的权衡关系,相关系数的绝对值越大,其权衡或协同程度越高^[32]。

(2) 动态权衡/协同分析法。基于差异比较法^[49-50],将协同关系拆分成正向协同关系和负向协同关系,以此研究不同生态系统服务之间的动态权衡/协同关系。计算公式如下所示^[50]:

$$A_{T_1} - A_{T_2} = \Delta A \tag{10}$$

$$B_{T_1} - B_{T_2} = \Delta B \tag{11}$$

$$\Delta A \times \Delta B = C \tag{12}$$

式中: T_1 和 T_2 分别为两个不同的时期; A_{T_1} 和 A_{T_2} 分别为 T_1 时期和 T_2 时期服务 A 的值, B_{T_1} 和 B_{T_2} 分别为 T_1 时期和 T_2 时期服务 B 的值; ΔA 和 ΔB 分别为服务 A 和服务 B 在 T_1 到 T_2 期间的变化量。如果 $C=0$,则存在兼容关系;如果 $C<0$,则存在权衡关系;如果 $C>0$ 且 ΔA 和 ΔB 均 >0 ,则存在正向协同关系;如果 $C>0$ 且 ΔA 和 ΔB 均 <0 ,则存在负向协同关系。

4 结果与分析

4.1 南京都市圈生态系统服务的时空变化

4.1.1 产水服务 南京都市圈 2000 年、2010 年和 2020 年的年平均产水量分别为 362.35 mm,530.60 mm 和 673.41 mm,三期平均值为 522.12 mm,产水量呈逐期递增的趋势。其中,2010 年南部区域产水量普遍达到 600 mm 以上,增长较为明显;而 2020 年都市圈全域的产水量均有明显增长,南部局部区域产水量已增至 1 200 mm。这一现象产生的主要原因是近年来降水量的不断增加。产水量整体上呈南高北低的分布格局(图 2)。南京、常州(金坛区和溧阳市)等苏南城市以及宣城、芜湖和马鞍山等皖南城市的产水量较高,而位于皖中的滁州和苏北的淮安产水量较低,这是因为苏南和皖南等区域以亚热带湿润季风气候和亚热带季风气候为主,雨量充沛。从不同土地利用类型的产水量来看,人造地表的产水量较大,而产水量低值区(0~300 mm)与都市圈水体的分布接近一致。这是因为水体的蒸散发能力最强,而人造地表

由于低植被覆盖度(减少水量的蒸发)和高地表硬化度,从而降低了水量的损失。

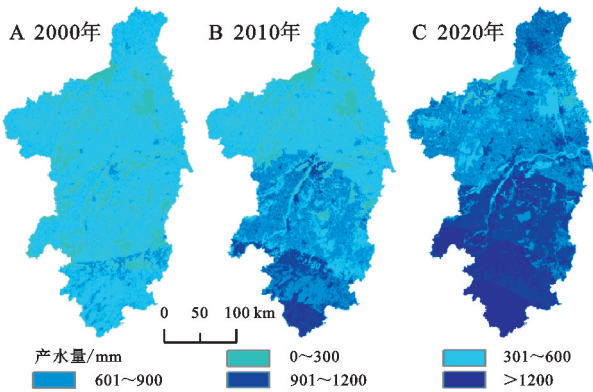


图 2 2000—2020 年南京都市圈产水服务时空变化

4.1.2 粮食供给服务 2000 年、2010 年和 2020 年南京都市圈的粮食年平均产量分别为 3.42 t/hm², 4.38 t/hm², 4.79 t/hm², 三期平均值为 4.20 t/hm², 粮食产量呈现出逐年增加的趋势。这主要是因为农业技术的提高和管理水平的进步,例如种子的优化以及化肥、农药的施用提高了粮食单产。从粮食供给服务的空间分布来看(图 3),粮食产量大体上呈南低北高的分布格局。2010 年以来,淮安、扬州、滁州以及马鞍山等城市的粮食产量均有明显增长,粮食产量高值区(>6 t/hm²)主要分布在都市圈东北部的淮安和扬州两市,该区域地貌以平原为主,地势平坦,便于耕作和粮食作物生长,同时也是我国重点产粮区,有重视粮食生产的历史和传统,近年来当地政府也在提高粮食产量方面实施了较多举措,如高标准农田建设和推进农业机械化等;粮食产量低值区(<2 t/hm²)主要分布在都市圈的南部区域,该区域山地、丘陵和盆地交错,土地利用类型主要为林地,耕地数量较少,因此粮食产量较小。

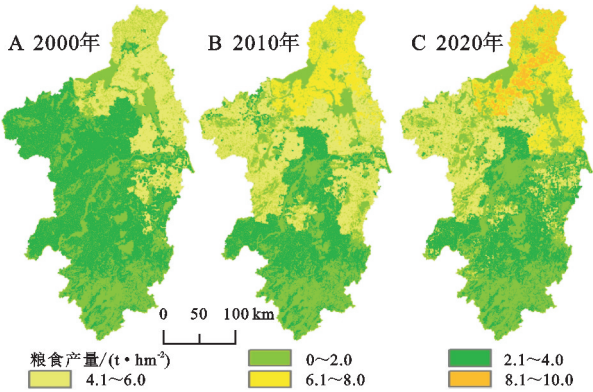


图 3 2000—2020 年南京都市圈粮食供给服务时空变化

4.1.3 土壤保持服务 南京都市圈的土壤保持量呈现出逐年递增的趋势,2000 年、2010 年和 2020 年的年平均土壤保持量分别为 31.26 t/hm², 47.88 t/hm², 48.68 t/hm², 三年平均值为 42.61 t/hm²。从土壤保

持服务的空间分布来看,土壤保持量的年际间空间差异并不明显,总体呈现出南高北低的分布格局(图4)。土壤保持服务与土地利用类型密切相关,高植被覆盖度能够显著提升土壤保持能力。宣城南部的泾县、旌德县、绩溪县和宁国市等区域的林地覆盖率非常高(其中泾县为69.67%、绩溪县为74.48%、旌德县为68.46%、宁国市为74.27%),因而提高了土壤保持量;此外,都市圈中西部的部分城市的局部区域也有零星高值区($>200 \text{ t/hm}^2$)分布,这主要是因为这些区域拥有较大比例的林地或草地,植被覆盖度较高。

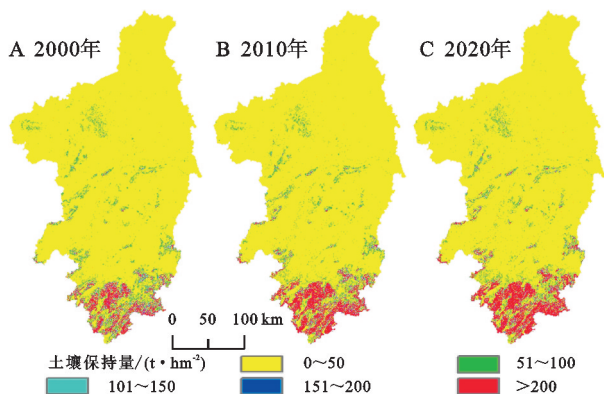


图4 2000—2020年南京都市圈土壤保持服务时空变化

4.1.4 碳固持服务 南京都市圈2000年、2010年和2020年的年平均碳固持量分别为 45.14 t/hm^2 , 44.77 t/hm^2 , 43.79 t/hm^2 ,三年平均值为 44.57 t/hm^2 ,碳固持量呈逐期递减的趋势,但下降幅度较小($<2.50\%$)。碳固持服务差异与地类变化密切相关,建设用地的碳固持能力低于农用地,近年来,随着都市圈城镇化进程的不断推进,建设用地面积逐年增加(2020年人造地表面积约占12.47%),其他地类面积相应减少,因此,碳固持量呈逐年下降的趋势。南京都市圈碳固持服务总体呈现出南高北低的空间格局(图5),其空间分布与土壤保持服务类似,均与土地利用分布有关,其中高值区($>120 \text{ t/hm}^2$)的地类主要为林地和草地,集中在宣城南部的泾县、旌德县、绩溪县和宁国市、芜湖的繁昌区和滁州的全椒县和南谯区、常州的溧阳市以及镇江的句容市等区域;低值区($0\sim30 \text{ t/hm}^2$)零星分布,其主要地类为水体和人造地表。

4.2 南京都市圈生态系统服务能力的地类差异及区域异质性

生态系统服务与土地利用类型密切相关,这体现在不同地类所提供生态系统服务的能力和种类不同,例如林地提供土壤保持服务的能力高于其他地类;此外,相同地类提供同种生态系统服务的能力存在区域差异,这主要受气候和地理环境等因素的影响,例如耕地在不同区域的粮食产量存在明显差异。因此,通

过对比不同地类的每种生态系统服务供给能力以及区域差异,可以有效识别每种生态系统服务的优势地类与区域,从而为编制国土空间规划、生态修复专项规划以及合理配置土地资源提供科学依据。

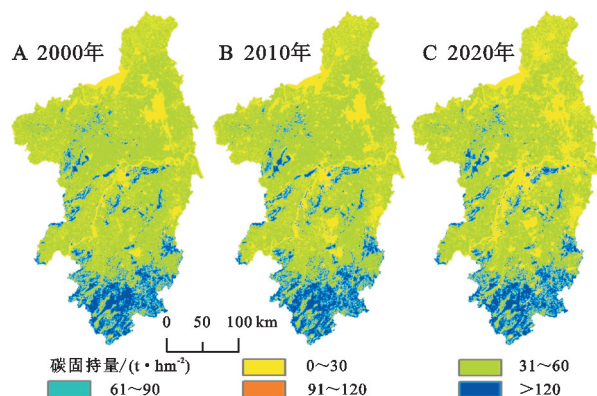


图5 2000—2020年南京都市圈碳固持服务时空变化

4.2.1 不同土地利用类型的生态系统服务能力差异 为了比较不同土地利用类型所提供的生态系统服务能力差异,本研究基于土地利用数据,采用 ArcGIS 10.3 对每种生态系统服务进行分区统计,得到不同土地利用类型所对应的每种生态系统服务的均值,经标准化处理后,使用 Origin 2021 的折线图对结果进行可视化(图6)。需要说明的是,考虑到粮食供给服务仅与耕地相关,因此未对其进行可视化处理。

不同土地利用类型所提供的同种生态系统服务的能力在不同年份略有差异,但是从三年平均值来看,裸地和人造地表提供产水服务的能力最强,水体最弱,耕地、林地和草地较为接近。其主要原因有:(1)裸地和人造地表等地类的土地表层硬化程度较高,不透水性更强,径流系数较大,当降雨落至地面时不易向下渗透,此外这些地类植被覆盖度较低,植物的蒸腾作用弱,从而导致其产水量较高^[51-52];(2)水体的蒸散发能力最强,产水量则最低;(3)耕地、林地和草地等地类植被覆盖率较高,植物蒸腾作用消耗水分,从而降低了产水量。在提供土壤保持服务的能力方面,林地最强,其次为草地,其他地类均较弱。这主要是因为林地和草地的植被覆盖度较高,密集的植被能够通过林冠截留和枯枝落叶拦蓄等功能来提高土壤抵御雨水冲蚀的能力^[53-54]。提供碳固持服务的顺序为:林地>湿地>耕地>草地>人造地表>裸地>水体。林地等高植被覆盖率的,其植被可以借助发达的根系来吸收土壤中的碳、产生的枯枝落叶能够固定地表的碳以及通过叶片等的光合作用来吸收和固定空气中的碳^[54],因此碳固持能力强。此外,2000—2020年,人造地表、耕地和林地等地类提供产水服务的能力在逐年增强,这可能是由于降水量逐年增加所导致的。

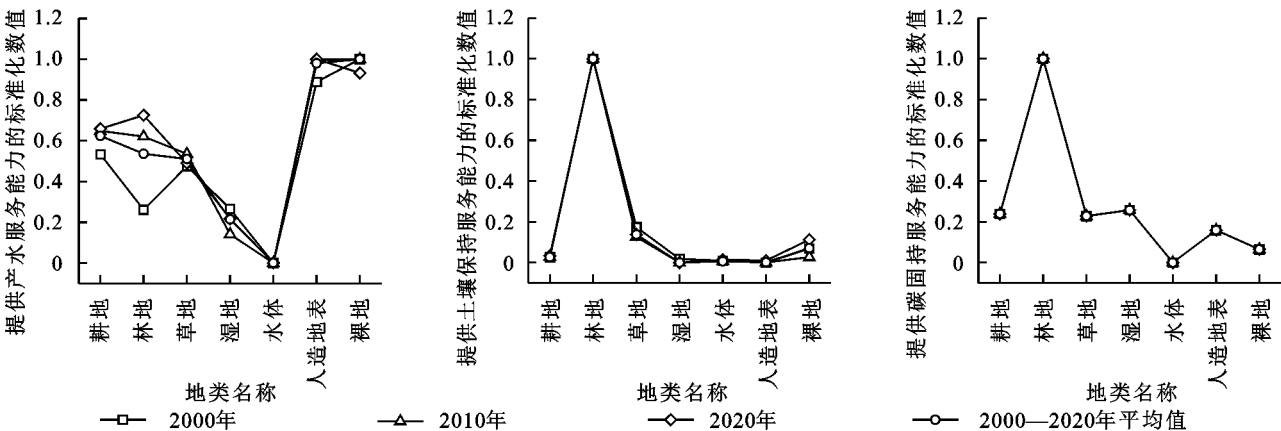


图 6 南京都市圈各地类生态系统服务能力对比

4.2.2 相同土地利用类型生态系统服务能力的区域异质性 为了进一步对比相同土地利用类型生态系统服务的区域差异,对都市圈范围内各行政单元(以地级市为主)的同一土地利用类型的生态系统服务进行分区统计(图 7)。在分区统计时,产水服务选择了耕地、林地、草地和人造地表等 4 种地类,这主要是因为都市圈湿地和裸地的总面积占比不到 1%,因此只考虑了主要地类;在土壤保持服务中选择了提供服务能力较强的林地和草地等 2 种地类;粮食供给服务仅涉及耕地;由于 InVEST 模型评估碳固持服务时所选择的碳库参数仅与土地利用类型相关,尚未考虑区域差异性,因此本部分并未对碳固持服务的能力进行区域对比。由图 7 可知,芜湖和宣城的耕地、林地、草地和人造地表等 4 种地类

提供产水服务的能力最强,这是因为芜湖和宣城地处都市圈南部,雨量充沛,从而提高了该区域各种地类的产水量。此外,宣城的林地和草地提供土壤保持服务的能力也最强,这主要是该区域林、草地规模大,集中连片的植被覆盖提高了区域物种丰富度,水分蒸发和拦截雨水的能力强,从而提高了水土保持能力;而扬州和淮安的耕地提供粮食供给服务的能力最强,这是因为该区域地貌以平原为主,地势平坦,便于耕作和粮食作物生长。产水和土壤保持服务除了与土地利用类型有关,还受气候因素(特别是降水和蒸散发)的剧烈影响,所以在不同区域,即使是同种土地利用类型,生态系统服务能力也不同;而粮食供给服务与地形、气候、土壤肥力及农业化政策和技术等因素均有关系。

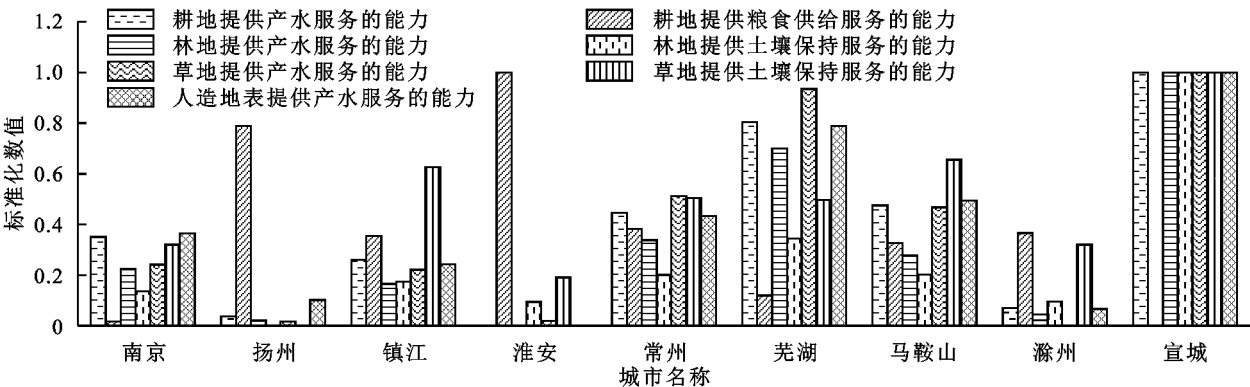


图 7 南京都市圈同种地类生态系统服务的区域差异性

4.3 南京都市圈多重生态系统服务热点区及其热点服务

基于热点区识别方法,获得 2000—2020 年南京都市圈多重生态系统服务热点区分布情况(图 8),包括 3 重生态系统服务热点区,2 重生态系统服务热点区,1 重生态系统服务热点区和非热点区等 4 种类型。总体来看,南京都市圈多重生态系统服务热点区以 1 重服务和 2 重服务热点区这两种类型为主。其中,1 重服务热点区总体呈先增后减的趋势,像元个

数在 2000 年占比为 44.32%,2010 年和 2020 年则升高至 52.24%和 50.63%;2 重服务热点区则呈先减后增的趋势,像元个数占比从 2000 年的 41.81%,下降至 2010 年的 27.80%,而 2020 年又回升至 33.68%;3 重服务热点区的像元个数占比较少,2000 年、2010 年和 2020 年分别为 4.00%,7.30%和 4.34%;1 重服务热点区增加及 2 重服务热点区的减少表明,南京都市圈生态系统服务之间的权衡程度在增强。结合热点区(图 8)与热点服务的空间分布(图 9)来看,1 重服

务热点区主要分布在北部,热点服务主要为粮食供给服务;这是因为该区域耕地面积较大,其主导功能为粮食供给服务;在前述不同土地利用类型的生态系统服务能力差异的分析结果显示,耕地所提供的产水、土壤保持和碳固持等服务能力相比其他地类较低,因此该区域为以粮食供给服务为主的1重服务热点区。2重服务热点区主要分布在中部,热点服务主要为产水和粮食供给服务组合;耕地规模由北向南呈逐渐下降趋势,而降雨量逐渐增加,因此在二者权衡作用下中部为产水和粮食供给服务的2重服务热点区。3重服务热点区集中在南部的宣城市,即泾县、旌德县、绩溪县和宁国市等区域,热点服务主要为产水、土壤保持和碳固持服务组合;根据前述分析,宣城林地覆盖度高,土壤保持和碳固持能力强,并且南部雨量充沛增加了产水量,因此宣城市为产水、土壤保持和碳固持服务的3重服务热点区。

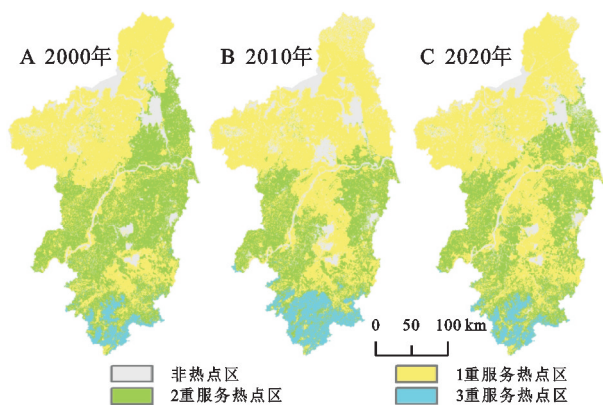


图8 2000—2020年南京都市圈多重生态系统服务热点区

表1 2000—2020年南京都市圈生态系统服务静态权衡/协同关系的时间变化

生态系统服务名称	2000年的相关系数	2010年的相关系数	2020年的相关系数
产水服务与粮食供给服务	0.40**	-0.06**	-0.18**
产水服务与土壤保持服务	-0.09**	0.20**	0.23**
产水服务与碳固持服务	-0.30**	0.13**	0.16**
粮食供给服务与土壤保持服务	-0.25**	-0.22**	-0.19**
粮食供给服务与碳固持服务	-0.44**	-0.39**	-0.31**
土壤保持服务与碳固持服务	0.41**	0.39**	0.40**

注: **表示在0.01水平上显著相关,产水服务(WY)、粮食供给服务(FP)、土壤保持服务(SR)和碳固持服务(CS)。

4.4.2 动态权衡/协同关系分析 采用差异比较法分析南京都市圈生态系统服务动态权衡/协同关系,分析结果见图10。从总体情况及其变化趋势来看,产水服务与土壤保持、粮食供给服务,土壤保持与粮食供给服务在空间上主要表现为正向协同关系,这主要是因为南京都市圈产水量、粮食产量和土壤保持量均在逐年递增,但这种正向协同关系呈逐渐减弱,权衡关系呈逐渐增强的趋势,说明这几种服务之间相互制约,需要引起注意。碳固持服务与产水、粮食供给和土壤保持等服务在空间上表现为兼容关系,这是因

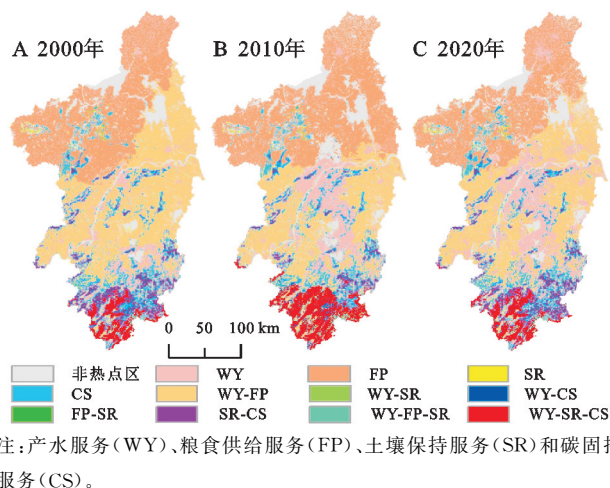


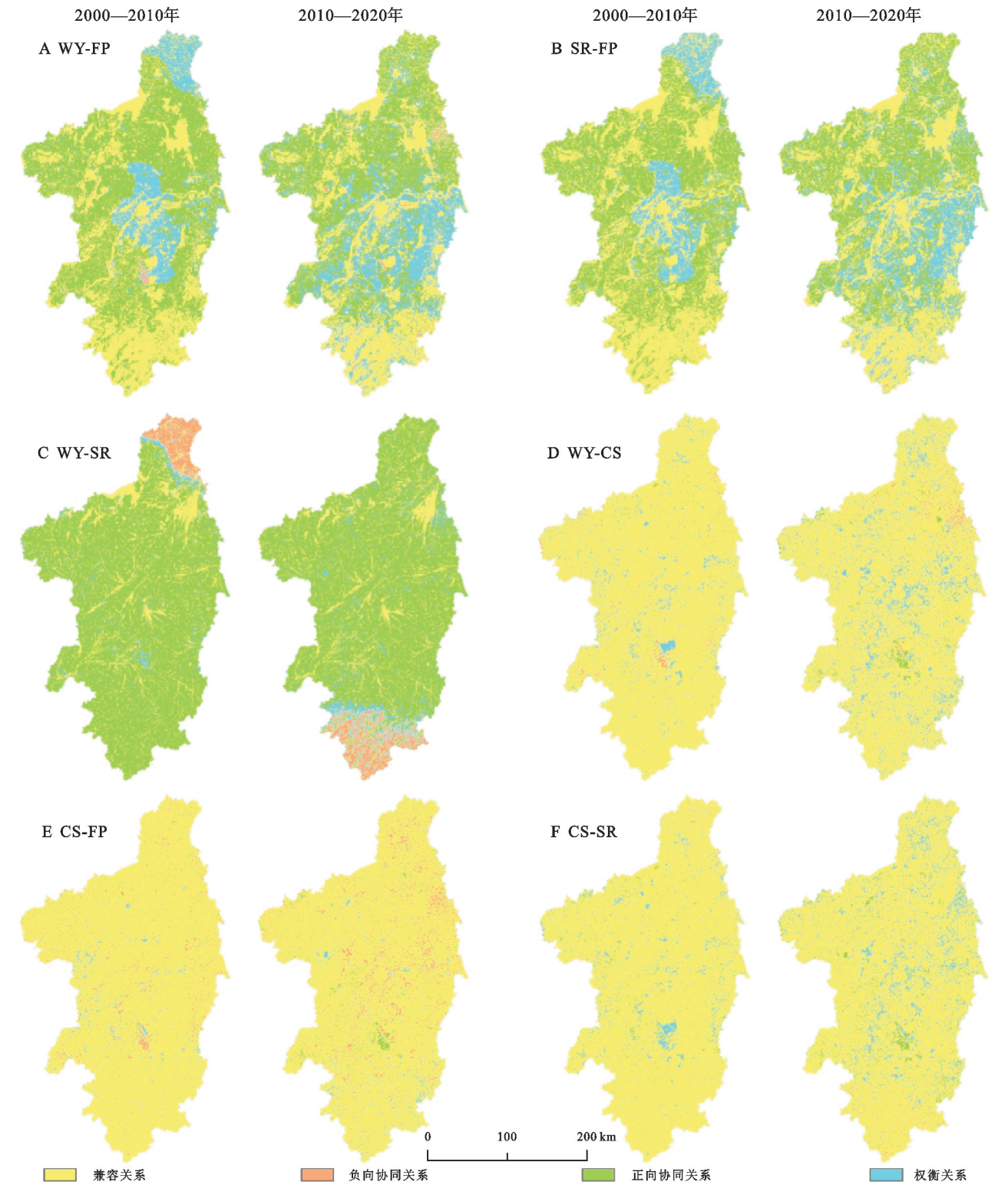
图9 2000—2020年南京都市圈热点服务分布

4.4 南京都市圈生态系统服务权衡/协同关系分析

4.4.1 静态权衡/协同关系分析 采用相关系数法从静态的角度分析南京都市圈生态系统服务的权衡/协同关系,分析结果见表1。总体来看,4种生态系统服务之间的相关性均通过了0.01水平上的显著性检验,即4种生态系统服务之间均具有显著的静态权衡/协同关系。在2000年、2010年和2020年,产水服务与土壤保持、碳固持服务均呈现出先权衡后协同的变化趋势;而产水服务与粮食供给服务呈现出先协同后权衡的变化趋势;粮食供给服务与土壤保持、碳固持服务在3a间均为权衡关系,且年间呈现缓慢下降的趋势;土壤保持服务与碳固持服务在3a间均为协同关系,相关性最大值为0.41,最小值为0.39,两种服务的相关性年际间波动较小,表明土壤保持服务与碳固持服务的协同关系较为稳定。

为差异比较法是根据两期数据的差值来判定权衡/协同关系,而碳固持服务与土地利用类型变化密切相关,研究区绝大多数区域的地类在过去20a均未发生显著变化,因此碳固持变化量表现为0,进而导致碳固持服务与其他服务之间表现为兼容关系,但这种兼容关系呈逐年减弱的趋势。此外,2000—2020年权衡/协同关系在区域上也存在很大改变。其中,粮食供给与产水、土壤保持等服务之间表现为权衡关系的区域,从2000—2010年的南京市、淮安市的涟水县及淮安区转变为2010—2020年的常州市(金坛区和

溧阳市)和扬州市;产水服务与土壤保持服务之间表现为负向协同关系的区域从 2000—2010 年的淮安市的涟水县与淮安区转变为 2010—2020 年的宣城市的泾县、旌德县、绩溪县和宁国市。



注:产水服务(WY)、粮食供给服务(FP)、土壤保持服务(SR)和碳固持服务(CS),WY—FP代表产水服务和粮食供给服务,其他类似。

图 10 南京都市圈 2000—2020 年生态系统服务的动态权衡/协同关系

5 讨论与结论

5.1 讨论

基于上述研究结果,对南京都市圈国土空间规

划编制及国土空间生态修复工作有以下几点启示:
(1) 产水与粮食供给属于供给服务,可以在区域之间进行转移,例如将粮食主产区的粮食运输到粮食供给不足的区域;而土壤保持与碳固持属于支持和调节服

务,虽然可能会存在一定的空间溢出效应,但是其作用仅仅在区域范围内显著。因此,可以在整个都市圈尺度考虑产水与粮食供给服务的供需平衡,而土壤保持和碳固持服务则需在区域尺度上调节具体规模。林地是土壤保持和碳固持服务的优势地类,因此,都市圈中部与北部的区域在建设应增加城市绿地面积,尤其是林地面积,以提高区域的调节和支持服务的能力;同时,北部区域的耕地可以间隔种植适当规模的林、草等植被,从而在保障粮食产量的同时,也提高了土壤保持和碳固持等服务的能力。(2) 热点区及其热点服务是国土空间规划工作需要重视的区域。例如,宣城大部分区域为以产水、土壤保持和碳固持为主的3重生态系统服务热点区,生态系统服务综合能力较强。因此,当地政府应该进一步加强对林地规模的保护,严格控制建设用地占用林地,以保障宣城市的生态系统服务水平。苏北的淮安和苏中的扬州粮食供给服务能力最强,并且考虑到该区域的粮食可能还需要供给其他区域,因此保持和提高该区域粮食产量至关重要。但是随着苏南工业化发展的趋于饱和,部分工业已经向苏北和苏中扩展转移,2020年末淮安和扬州的工业产值占区域生产总值的比例分别增加至31.97%和37.10%,因此淮安和扬州需进一步提高土地的集约节约水平以尽可能的降低工业化和城镇化对农用地尤其是优质耕地的蚕食,严守永久基本农田保护红线和耕地红线,以稳定都市圈内的粮食供需平衡。(3) 静态和动态权衡/协同方法有两方面的不同:(1) 静态方法以单期数据为基础,对区域生态系统服务的数值进行相关性测算;而动态方法考虑时间的变化,用两期数据的差值来反映研究区的动态权衡/协同关系。(2) 静态方法以整个南京都市圈为尺度,探究区域整体的权衡/协同关系;动态方法以栅格单元为尺度,探究区域空间一致性与局部差异性。因此两种方法得到的权衡/协同结果存在差异,在决策制定中要依据实际情况选择合适的方法。具体而言,首先,当涉及都市圈全域尺度时,应选择静态方法;聚焦于微观尺度时,则选择动态方法。其次,当需要针对现状或单一年份制定决策时,应该考虑静态的权衡/协同结果;当涉及时间变化时可以考虑动态的权衡/协同结果。最后,综合两种方法分析权衡/协同关系更加全面,要关注短期效益和长期效益结合、当前效益与未来效益结合,尽可能降低权衡、增加协同,从而实现可持续发展^[25]。

本研究主要关注了南京都市圈2000—2020年的

生态系统服务时空变化及权衡/协同关系,生态系统服务的类型选取了4种主要的服务;同时受限于土地利用等数据的可获得性,研究的时间截面仅选择了2000年、2010年、2020年等3期,而南京都市圈规划获得国家批准是在2021年后,随着都市圈建设的不断推进,将导致区域内的城镇发展及土地利用格局改变,对区域生态系统服务的影响将产生更显著的变化,因此还需进一步加强都市圈生态系统服务的评估与跟踪监测。此外,南京都市圈所涉及的城市与长江大保护密切相关,目前长江周边正在腾退化工企业,逐步开展国土空间生态修复工作,因此,未来研究还应从生态系统服务角度加强对长江沿线国土空间生态修复工作开展的效益评估。

5.2 结论

(1) 在2000年、2010年和2020年,南京都市圈的产水量、粮食产量、土壤保持量和碳固持量的三年平均值分别为522.12 mm, 4.20 t/hm², 42.61 t/hm², 44.57 t/hm²。产水、粮食供给和土壤保持等3种生态系统服务总体上呈不断增加的趋势;而碳固持服务呈不断下降的趋势。

(2) 从不同土地利用类型来看,裸地 and 人造地表提供产水服务的能力最强;林地提供土壤保持和碳固持服务的能力最强。受地类和区域禀赋的作用,形成了南高北低的产水、土壤保持和碳固持服务的空间分布特征,也产生了粮食供给服务南低北高的空间格局。

(3) 从生态系统服务综合供给能力来看,南京都市圈从北到南依次形成了以粮食供给服务为主的1重服务热点区、以产水和粮食供给服务为主的2重服务热点区和以产水、土壤保持和碳固持服务为主的3重服务热点区。

(4) 从静态角度来看,产水、粮食供给等供给类服务与土壤保持、碳固持等支持与调节类服务主要表现为权衡关系,且权衡程度有减弱的趋势。从动态角度来看,产水服务与土壤保持、粮食供给服务,土壤保持与粮食供给服务在空间上主要表现为正向协同关系,但这种正向协同关系呈逐渐减弱的趋势,权衡关系呈逐渐增强的趋势。由此可见,不同权衡/协同测度方法得到的结果有所不同,因此,在决策制定时应该选择合适的角度,从而精准把握区域生态系统服务之间的关系,进而提高管理决策的准确性。

参考文献:

- [1] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].

- Ecological Economics, 1997, 25(1): 3-15.
- [2] 林媚珍, 刘汉仪, 周汝波, 等. 多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2657-2669.
- [3] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J]. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34.
- [4] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.
- [5] Braun D, Jong R, Schaepman M E, et al. Ecosystem service change caused by climatological and non-climatological drivers: a Swiss case study[J]. Ecological Applications, 2019, 29(4): e01901.
- [6] 姜晗, 吴群. 基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2712-2725.
- [7] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- [8] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 等. 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[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416.
- [9] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [10] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [11] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [12] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [13] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 592-602.
- [14] Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): art28, DOI: 10.5751/ES-01667-110128.
- [15] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [16] Haase D, Schwarz N, Strohbach M, et al. Synergies, trade-offs, and losses of ecosystem services in urban regions: an integrated multiscale framework applied to the Leipzig-Halle Region, Germany[J]. Ecology and Society, 2012, 17(3), DOI: 10.5751/ES-04853-170322.
- [17] Lester S E, Costello C, Halpern B S, et al. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. Marine Policy, 2013, 38: 80-89.
- [18] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 等. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策[J]. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [19] Pan J, Wei S, Li Z. Spatiotemporal pattern of trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in an arid inland river basin in NW China[J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106345.
- [20] Geng W, Li Y, Zhang P, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs/synergies among ecosystem services in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108825.
- [21] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210-216.
- [22] Niu T, Yu J, Yue D, et al. The temporal and spatial evolution of ecosystem service synergy/trade-offs based on ecological units[J]. Forests, 2021, 12(8), DOI: 10.3390/f12080992.
- [23] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [24] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, et al. Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies[J]. Ecological Economics, 2018, 150: 96-106.
- [25] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同研究: 发展历程与研究特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 11-25. DOI: 10.13254/j. jare, 2021, 0640.
- [26] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1178-1188.
- [27] Fargione J, Hill J, Tilman D, et al. Land clearing and the biofuel carbon debt[J]. Science, 2008, 319(5867): 1235-1238.
- [28] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6337-6344.
- [29] Yang M, Gao X, Zhao X, et al. Scale effect and spatially explicit drivers of interactions between ecosystem services: A case study from the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147389.
- [30] Peng J, Tian L, Liu Y, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607: 706-714.

- [31] Qiu M, Van de Voorde T, Li T, et al. Spatiotemporal variation of agroecosystem service trade-offs and its driving factors across different climate zones[J]. *Ecological Indicators*, 2021,130:108154.
- [32] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].*地理科学进展*,2017,36(12):1571-1581.
- [33] 黄颖,税伟,温铁军,等.安庆都市圈生态系统服务权衡与协同[J].*中国农业大学学报*,2022,27(3):217-228.
- [34] Wu S, Li S. Ecosystem service relationships: Formation and recommended approaches from a systematic review[J]. *Ecological Indicators*, 2019,99:1-11.
- [35] Gou M, Li L, Ouyang S, et al. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,307:127208.
- [36] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].*地理研究*,2021,40(3):821-838.
- [37] Zhang H, Pang Q, Hua Y, et al. Linking ecological red lines and public perceptions of ecosystem services to manage the ecological environment: A case study in the Fenghe River watershed of Xi'an[J]. *Ecological Indicators*, 2020,113:106218.
- [38] 刘业轩,石晓丽,史文娇.福建省森林生态系统水源涵养服务评估:InVEST模型与meta分析对比[J].*生态学报*,2021,41(4):1349-1361.
- [39] 赵文亮,贺振,贺俊平,等.基于MODIS-NDVI的河南省冬小麦产量遥感估测[J].*地理研究*,2012,31(12):2310-2320.
- [40] 李军玲,郭其乐,彭记永.基于MODIS数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型[J].*生态环境学报*,2012,21(10):1665-1669.
- [41] 戴路炜,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].*生态学报*,2020,40(9):2863-2876.
- [42] 占滢,于洋,吴秀芹.湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J].*生态学报*,2021,41(18):7260-7272.
- [43] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].*地理学报*,2019,74(9):1921-1937.
- [44] 胡胜,曹明明,刘琪,等.不同视角下InVEST模型的土壤保持功能对比[J].*地理研究*,2014,33(12):2393-2406.
- [45] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].*生态学报*,2021,41(10):4052-4065.
- [46] Ouyang X, Tang L, Wei X, et al. Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations[J]. *Land Use Policy*, 2021,109(4):105587. DOI:10.1016/j.landusepol.2021.105587.
- [47] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].*地理学报*,2018,73(5):868-879.
- [48] 张影,谢余初,齐姗姗,等.基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J].*资源科学*,2016,38(8):1585-1593.
- [49] 刘洋,毕军,吕建树.生态系统服务权衡与协同关系及驱动力:以江苏省太湖流域为例[J].*生态学报*,2019,39(19):7067-7078.
- [50] 张紫怡,刘艳芳,张扬,等.生态功能区生态系统服务协同权衡对影响因子的空间非平稳性响应:以福建省为例[J].*武汉大学学报:信息科学版*,2022,47(1):111-125. DOI:10.13203/j.whugis20200700.
- [51] 李子,张艳芳.基于InVEST模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].*水土保持学报*,2021,35(4):178-185. DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.025.
- [52] 张明珠,王敏,张晓祥,等.基于InVEST模型的杭州市生态系统服务评估[J].*地理信息世界*,2021,28(2):57-64.
- [53] 刘华妍,肖文发,李奇,等.北京市生态系统服务时空变化与权衡分析[J].*生态学杂志*,2021,40(1):209-219. DOI:10.13292/j.1000-4890.202101.033.
- [54] 胡秀芳,赵军,王蓓,等.黑河流域生态系统服务空间协同与权衡变化[J].*生态学杂志*,2022,41(3):580-588. DOI:10.13292/j.1000-4890.202201.001.