

DOI: 10.5846/stxb201809141982

税伟,杜勇,王亚楠,杨海峰,付银,范冰冰,黄梦圆.闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟.生态学报,2019,39(14): - .
Shui W, Du Y, Wang Y N, Yang H F, Fu Y, Fan B X, Huang M Y. Spatio-temporal dynamics and scenarios simulation of trade-offs between ecosystem services in Min Delta urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟

税 伟^{1,2,*}, 杜 勇^{2,3}, 王亚楠¹, 杨海峰^{2,3}, 付 银¹, 范冰冰¹, 黄梦圆⁴

1 福州大学环境与资源学院, 福州 350116

2 福州大学空间数据挖掘与共享教育部重点实验室, 福州 350116

3 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福州 350116

4 福建农林大学经济学院, 福州 350002

摘要:闽三角城市群由厦门、泉州和漳州 3 个城市组成,是我国沿海开放地区之一。21 世纪以来,快速的城镇化过程严重影响了该区域的生态安全以及生态系统服务功能,制约了当地的经济社会可持续发展。因此,研究闽三角城市群的生态系统服务权衡协同关系,对该区域的生态安全协同联动管理以及社会经济可持续发展具有重要意义。本文估算了闽三角城市群的保水服务、保土服务、NPP 和食物供给 4 种生态系统服务功能,使用空间分析和空间统计等方法分析其时空动态变化和相互之间的权衡协同关系,并在不同情景下模拟了 2030 年的生态系统服务空间分布和权衡关系。结果表明:2005—2015 年来,闽三角城市群的保水服务、保土服务、NPP 和食物供给四种生态系统服务功能均呈下降趋势;在 2005—2015 年间,闽三角城市群的保水、NPP 与保土 3 种服务之间呈现协同关系,食物供给服务与其他三种服务均呈权衡关系,虽四种服务的权衡协同关系未变,但权衡协同程度发生了复杂的变化;在空间分布特征上,晋江流域的生态系统服务权衡协同程度均高于九龙江流域,闽三角 3 个城市的生态系统服务权衡协同关系统一呈现厦门市>泉州市>漳州市;在不同情境设置中,自然情景下 4 种生态系统服务出现大幅降低,协同关系主要呈降低趋势,而权衡关系加剧,与规划情景相比,保护情景下的协同关系更高,权衡关系更低。

关键词:生态系统服务;权衡协同;情景模拟;闽三角城市群

Spatio-temporal dynamics and scenarios simulation of trade-offs between ecosystem services in Min Delta urban agglomeration

SHUI Wei^{1,2,*}, DU Yong^{2,3}, WANG Yanan¹, YANG Haifeng^{2,3}, FU Yin¹, FAN Bingxiong¹, HUANG Mengyuan⁴

1 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2 Key lab of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

3 Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

4 Economics College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: The Min Delta urban agglomeration includes three cities (Xiamen, Quanzhou, and Zhangzhou) and is an open coastal area in China. Since the 21st century, rapid urbanization has seriously affected the ecological security and ecosystem services function of the region and has restricted the sustainable development of the local economy and society. For this reason, Understanding the trade-offs and synergies of ecosystem services in the Min Delta Urban Agglomeration is of considerable significance to the coordinated linkage management of ecological security and the sustainable development of social economy in this region. This paper estimated four kinds of ecosystem services (water conservancy, soil conservation,

基金项目:

收稿日期:2018-09-14; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

NPP(Net primary productivity), and food supply) in the Min Delta urban agglomeration, and the spatial-temporal dynamics and trade-offs-synergies among the ecosystem services were analysed using correlation and spatial analyses. Moreover, the spatial distribution and trade-offs of ecosystem services in 2030 were simulated under different scenarios. The results showed that: From 2005 to 2015, trend for all four types of ecosystem services were decreased, and there was a synergies relationship between water conservancy, NPP and soil conservation services. However, there was a trade-offs between food supply service and the other three services. From 2005 to 2015, the trade-offs and synergies between the four services remained unchanged, the degree of complex changes have taken place. In terms of spatial distribution characteristics, the degree of ecosystem service trade-offs and synergies in Jinjiang river basin is higher than that in Jiulong river basin. The trade-offs and synergies relationship of ecosystem service in three cities of Min Delta Urban Agglomeration presents uniformly in Xiamen > Quanzhou > Zhangzhou. In different scenario Settings, there was a significant decrease in the four ecosystem services under the natural scenario, and the synergistic relationship was mainly in a downward trend, while the trade-offs relationship was intensified. Compared with the planning scenario, the synergistic relationship under the protection scenario was higher and the trade-offs relationship was lower.

Key Words: ecosystem service; trade-offs and synergistic; scenario simulation; Min Delta urban agglomeration

生态系统服务是指生态系统所形成与维持的人类赖生存和发展的环境与效用,是人类直接或间接从生态系统得到的所有福祉^[1-2]。生态系统服务功能包括调节服务、供给服务、支持服务和文化娱乐服务等四大类^[3-4]。自 20 世纪 90 年代以来,生态系统服务的有关研究逐渐兴起,随着研究的深入,国内外学者发现,由于人类社会经济发展对生态系统干扰的增加,引起了生态系统内部和不同生态系统之间物质、能量、信息的流动、迁移和转化,影响生态系统结构、功能与过程^[5],导致生态系统服务之间关系的动态变化。生态系统服务之间存在复杂的关系,一般表现为权衡-协同关系^[6]。其中,权衡关系所表示的是生态系统服务之间的对立关系,是指一种生态系统服务供给的增加会导致其他生态系统服务供给的减少^[7],协同关系则表示两种或者两种以上的生态系统服务功能之间同时增强或者减弱^[8]。在供给服务之间,供给服务与调节服务之间以及支持服务之间通常存在权衡关系^[9],四类生态系统服务存在协同关系,特别是在调节服务、支持服务和文化服务之间最为普遍^[10]。其中有些生态系统服务的权衡-协同是直接的、相互关联和内在生成的,相反,其他生态系统服务权衡-协同则是在外在干扰下形成的^[11]。由于地域空间和人类干扰的影响,生态系统服务的权衡-协同关系具有时空动态性和空间异质性^[12]。此外,权衡具有可逆性^[13],若干扰服务的因素得到消除或者缓解,有些生态系统服务就可以恢复到原来的状态。但是大部分生态系统服务具有一定的承载阈值,一旦超出这个阈值,则难以恢复。因此,明晰多元生态系统服务的权衡-协同关系的时空特征演变可以适时诊断生态系统服务的结构与功能的受损状态^[14],及时调整区域发展政策,创造条件保障和维持生态系统服务的自我条件机制,对实现社会经济可持续发展具有重要意义。

随着生态系统服务价值评估方法的成熟运用,越来越多的学者开始关注生态系统服务的权衡-协同关系^[15]。目前,对生态系统服务的权衡-协同研究强调对两者关系的甄别^[16],其中相关分析是最普遍的方法^[17],通过核算相关系数,如其值为负则判定为权衡关系,反之则为协同关系。也有学者运用权衡-协同度模型^[18-20],以协同度的数值大小来量化权衡-协同关系。研究尺度从全球到行政区^[21-22],涵盖其内部的盆地^[23]、流域^[24-25]、重要经济区^[26-27]、草地^[28]、农田^[29]等生态易损区。研究重点放在探讨土地利用/覆被变化对生态系统服务权衡-协同的影响^[30-32]。

城市生态系统是一种自然-社会-经济复合的生态系统,受到自然和社会经济的双重影响^[33]。城市生态系统服务功能受到人类行为和管理决策的支配与干扰^[34],如人类对土地利用类型的改变,会导致生态系统服务之间的关系发生变化,尤其是在快速城市化区域,高强度人类活动所导致的土地利用类型的变化严重影响着城市生态系统服务能力^[35]。城市群作为城市的组合体,既有与城市相同的特征,也有不同之处,既是一个有

机的整体,各个城市又有各自的特色。厘清城市群生态系统服务功能间的相互关系、变化规律以及未来演变趋势,对于人类合理调控社会经济发展方式、寻求城市和城市间的生态系统服务管理途径与方法,实现城市群生态安全与可持续发展尤为关键。目前尚缺乏对完整的城市群生态系统服务权衡与协同关系的研究,且有关研究着重于对历史和现状的分析,对未来生态系统服务权衡进行情景分析的研究还较为欠缺。本文选择处于快速城市化背景下的闽三角城市群为研究区域,测算 2005 年、2010 年和 2015 年闽三角城市群的保水服务、保土服务、净初级生产力(NPP)和食物供给服务 4 种生态系统服务功能,使用相关分析法、空间自相关和空间制图方法研究 4 种服务的时空动态变化规律和权衡关系,并基于 CA-Markov 模型在不同情景下模拟了 2030 年闽三角城市群的土地利用状态,进一步分析不同情景下闽三角城市群的生态系统服务权衡关系,为闽三角城市群的生态安全保障提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

闽三角城市群是指福建省闽南地区的厦门市、泉州市和漳州市 3 个地级市(包含 29 个县区市)所组成的城市群,是福建省的经济发展中心,也是我国沿海开放地区之一。研究区面积 2.53 万 km^2 ,2015 年常住人口近 2000 万人,平均海拔 345 m,年均降水量 1800—2000 mm,属于亚热带季风气候。闽三角城市群地处 21 世纪海上丝绸之路起点,属于海峡西岸经济区,与台湾省隔海相望,两地的历史文化渊源深厚,并且存在着较为紧密的社会经济往来。位于全国首个生态文明先行示范区福建省的闽三角城市群,进入 21 世纪以来,经历了快速的城镇化过程,在提升区域经济社会发展水平和人民生活水平的同时,也带来了一系列的生态环境问题,威胁着该地区的生态安全和可持续发展。

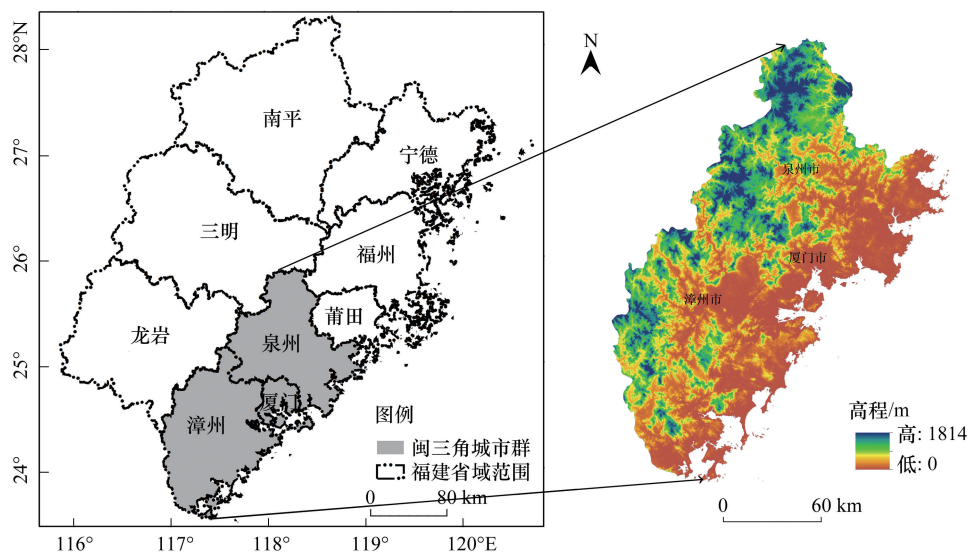


图 1 闽三角城市群区位

Fig.1 Location of the Min Delta Urban Agglomeration

1.2 数据来源

本文的数据来源:①土地利用分类数据,分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地六类,空间分辨率为 1 km,由中科院资源环境科学数据中心下载;②DEM 数据,空间分辨率为 30 m,由地理空间数据云下载;③气象站点数据,主要包括降水量、积温和辐射指标,由中国气象数据网下载;④NDVI 数据,选择 MODIS 中的 MOD13A3 数据,空间分辨率为 1 km;⑤土壤类型和土壤质地数据,空间分辨率为 500 m,由中国科学院资源环境科学数据中心下载;⑥社会经济统计数据,包括 2006、2011 和 2016 年的《厦门市统计年鉴》、《泉州市统计年鉴》和《漳州市统计年鉴》;⑦土地利用规划数据,包括《厦门市土地利用总体规划(2006—2020)》、《泉州市

土地利用总体规划(2006—2020)》和《漳州市土地利用总体规划(2006—2020)》。

2 研究方法

2.1 保水服务估算

植被的保水服务主要通过林冠截流、枯枝落叶层保水和土壤理水作用实现,以植被的蓄水能力来估算研究区的保水服务物质量^[36]。研究采用综合蓄水法估算保水量^[37-38],主要因素包括冠层截留量、枯枝落叶吸水能力和土壤层水分截留。计算公式为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

式中, Q 为单位面积的保水量; Q_1 是植被冠层的截留量; Q_2 是枯枝落叶层的吸水截留量; Q_3 是土壤层截留量。

$$Q_1 = \text{降水量(mm)} \times \text{林冠截留率(\%)} \times \text{面积(hm}^2\text{)} \times 10 \quad (2)$$

$$Q_2 = \text{枯枝落叶层干重(t/hm}^2\text{)} \times \text{饱和吸水率(\%)} \times \text{面积(hm}^2\text{)} \quad (3)$$

$$Q_3 = \sum_{i=1}^n \text{FMC} \times \text{面积(hm}^2\text{)} \times h_i \times 10^4 \quad (4)$$

$$\text{FMC} = 0.003075 \times n_1 + 0.005886 \times n_2 + 0.008039 \times n_3 + 0.002208 \times \text{OM} - 0.14340 \times \rho$$

式中:降水量由气象数据进行空间插值获得,林冠截留率、枯枝落叶层干重、饱和吸水率均在结合植被类型数据,参考前人研究成果获得。FMC 表示田间最大持水量,所涉及参数均由土壤类型及土壤质地数据集获得; h_i 表示土壤 i 的厚度(本文取闽三角的平均值为 0.5 m); n_1 表示土壤砂粒含量百分比; n_2 表示土壤粉砂含量百分比; n_3 表示土壤黏粒含量百分比; OM 表示土壤有机质含量百分比; ρ 表示土壤容重(g/cm^3)。

2.2 保土服务估算

计算土壤保持量主要有两种方法,一种是通过统计数据计算土壤保持量,另一种是通过“3S”技术结合模型计算,常用模型有 USLE 模型、RUSLE 模型和 LISEM 模型等,其中 USLE 模型由于计算科学、操作简便,在研究中使用频率最高^[39]。因此,本文选择 USLE 模型计算土壤保持量。土壤保持量的计算包括两个部分,一部分是潜在的土壤侵蚀量,一部分是现实土壤侵蚀量,两者之差为土壤保持量。计算公式为:

$$A_p = R \times K \times L \times S \quad (5)$$

$$A_r = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (6)$$

$$A_c = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (7)$$

式中, A_p 是潜在土壤侵蚀量; A_r 是现实土壤侵蚀量; A_c 是土壤保持量; R 是降雨量侵蚀因子; K 是土壤可蚀性因子; L 是坡长因子; S 是坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。

2.3 NPP 估算

植被净初级生产力(NPP)是指陆地植被在单位时间、单位面积内,通过光合作用产生的有机同化物去除自养呼吸而剩余的有机物质总量,它反映了植被群落在自然环境中生产有机物的能力^[40]。CASA 模型是广泛应用的 NPP 测评模型,计算公式为:

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (8)$$

式中, $\text{NPP}(x, t)$ 是象元 x 在月份 t 的净初级生产力($\text{g} \cdot \text{C/m}^2$); $\text{APAR}(x, t)$ 表示象元 x 在月份 t 的光和有效辐射(MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 是象元 x 在月份 t 的实际光能利用率($\text{g} \cdot \text{C/MJ}$)。

2.4 食物供给服务计算

食物供给是生态系统中重要的供给服务之一,食物是人类从生态系统中获取的基本物质,是人类不可缺少的。本文结合土地利用数据及统计年鉴数据,估算研究区内各类型土地利用的食物总产值,实现食物供给的空间化。计算公式为:

$$G_i = A_i \times N_i \quad (9)$$

式中, G_i 表示研究区中所对应的食物 i 的总产值; A_i 表示研究区域中食物 i 所占的面积; N_i 表示食物 i 的单位

面积产值。

$$N_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (10)$$

式中, F_i 表示食物在区域中的总产值; S_i 表示食物 i 在研究区域的总面积, 即各类土地利用类型的总面积。

食物供给的数据主要来源于 2006、2011 和 2016 年的《厦门市统计年鉴》、《泉州市统计年鉴》和《漳州市统计年鉴》, 鉴于闽三角城市群的畜牧业不发达, 因此只考虑耕地、林地和水域 3 种土地利用类型作为食物供给服务的来源, 其中, 耕地对应粮食作物的食物供给能力, 林地对应水果的食物供给能力, 水域对应淡水渔业的食物供给能力。

2.5 Markov-CA 模型

马尔科夫 (Markov) 预测法是一种基于马尔科夫链, 根据事件目前状况预测将来各个时刻 (或时期) 变动状况事件发生概率的方法^[41]。土地利用变化过程可视为马尔科夫 (Markov) 过程, 其状态转移过程无后效性^[42]。土地利用类型之间相互转换的面积数量或比例为状态转移概率, 可用如下公式对土地利用状态进行预测:

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (11)$$

式中, $S_{(t)}$ 和 $S_{(t+1)}$ 分别表示 t 和 $t+1$ 时刻土地利用结构的状态。

元胞自动机模型 (Cellular Automata, 简称 CA) 是时间、空间、状态都离散, 且空间的相互作用及时间上的关系皆为局部的网格动力学模型, 其计算原理为散布在规则格网中的每个元胞取有限的离散状态, 遵循同样的作用规则、确定的局部规则作同步更新, 每个变量只取有限的状态, 且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的^[43]。其计算公式如下^[44]:

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (12)$$

式中, S 表示元胞有限离散的集合状态; t 和 $t+1$ 表示不同的时刻; N 表示元胞的邻域; f 表示局域空间的元胞转换规则。

Markov 模型与 CA 模型均为时间和状态离散的动力学模型, 但 Markov 无法预测空间变量, 而 CA 的状态变量则与空间位置紧密相连。CA-Markov 模型不仅具有 Markov 模型可预测多种土地利用类型的预测数量上的优势, 同时也具备了 CA 模型模拟复杂系统时空动态演变的能力, 故将两种模型结合能有效地模拟土地利用的空间变化。本文的土地利用的模拟预测分析主要通过 IDRISI17.0 软件中的 Markov 模块和 CA-Markov 模块来实现。

3 结果与分析

3.1 闽三角城市群生态系统服务时空演变

根据相关模型, 在 ArcGIS10.0 软件中使用叠加分析等工具分别计算了闽三角城市群 2005、2010 和 2015 年的保水服务、保土服务、NPP 和食物供给服务, 并进行空间制图表达 (图 2)。保水服务、保土服务和 NPP 的空间分布具有较为明显的规律。取 3 种服务 3 个年份平均值进行空间自相关分析, 得到保水、保土和 NPP 三种服务的 Moran's 指数分别为 0.26、0.30 和 0.66, 均呈现空间正相关。NPP 的空间自相关性最强, 其中低-低值分布主要集中在泉州的主城区、晋江市、石狮市、厦门的大部分区域以及漳州市主城区; 高-高值主要分布在闽三角北部和西南部的山区森林地带。在 ArcGIS10.0 软件中分别统计 4 种生态系统服务功能的平均值, 发现在 2005—2015 年间, 保水服务、保土服务、NPP 和食物供给服务都出现了不同程度的下降, 保水服务的降幅为 15.8%, 保土服务的降幅为 21.5%, NPP 的降幅为 25%, 食物供给服务的降幅为 19.2%。

3.2 生态系统服务功能之间的权衡协同关系

3.2.1 闽三角城市群整体生态系统服务功能权衡协同关系

本文采用相关分析方法来分析 4 种生态系统服务功能之间的权衡协同关系。使用 ArcGIS10.0 软件在研

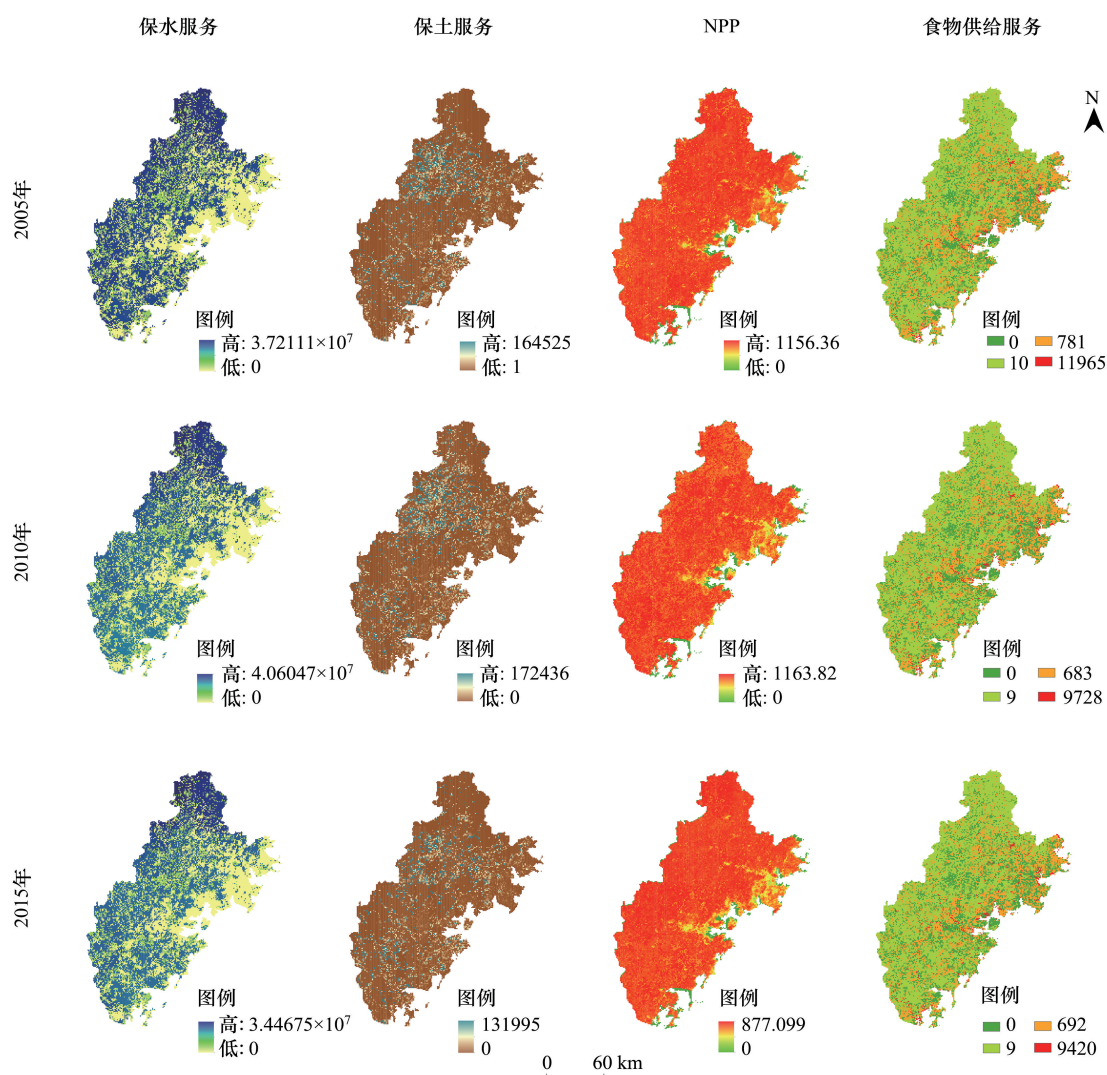


图 2 2005—2015 年闽三角城市群生态系统服务空间格局

Fig.2 Spatial pattern of the ecosystem services in Min Delta urban agglomeration from 2005 to 2015

究区域建立间隔为 1 km 的采样点,基于 4 种生态系统服务功能评估结果的栅格图进行空间采样,将采样得到的点数据导出为表格格式,在 SPSS22.0 软件中对同一年份中不同的生态系统服务功能进行 Person 相关分析。结果显示,2005—2015 年,保水服务、保土服务和 NPP 之间均呈协同关系,食物供给服务分别与保水服务、保土服务和 NPP 之间均呈权衡关系。分析其成因可知,在林地和草地两种土地利用类型中,保土服务、NPP 与保水服务能力较强,但是其食物供给能力较弱;而作为提供主要食物供给能力的耕地区域,其保土服务、NPP 与保水服务能力则较弱。此外,在 2005—2015 年间,保水服务与保土服务的协同关系呈减弱趋势,而食物供给服务与保水服务和 NPP 之间的权衡关系加剧。

表 1 2005—2015 年闽三角城市群生态系统服务权衡变化

Table 1 The dynamics of the trad-offs of ecosystem service in the Min Delta agglomeration from 2005 to 2015

年份 Year	保水与保土 Water and soil conservation	保水与 NPP Water conservancy and NPP	保水与食物供给 Water conservancy and food supply	保土与 NPP Soil conservation and NPP	保土与食物供给 Soil conservation and food supply	NPP 与食物供给 NPP and food supply
2005 年	0.107	0.358	-0.219	0.09	-0.064	-0.142
2010 年	0.137	0.349	-0.221	0.113	-0.073	-0.173
2015 年	0.087	0.414	-0.223	0.07	-0.06	-0.152

3.2.2 厦漳泉 3 个城市之间的生态系统服务权衡关系对比

作为闽三角城市群的组成部分,厦门、漳州和泉州都面临着快速城镇化所带来的生态安全问题,但是由于三个城市的发展程度不同,各自生态安全问题的特点和程度也不同,因此分别统计 3 个市的 4 种生态系统服务的权衡协同关系并进行对比分析。厦门市、泉州市和漳州市的 4 种生态系统服务功能之间权衡关系与闽三角城市群整体相同,保水服务、保土服务和 NPP 三种服务呈协同关系,食物供给服务与其他 3 种服务呈权衡关系。从空间尺度来看,厦漳泉 3 个城市的生态系统服务权衡程度对比为厦门市>泉州市>漳州,而保水服务、保土服务和 NPP 三种服务的协同关系对比为厦门市>泉州市>漳州。在时间尺度上,三市的保水与 NPP 之间的协同关系均升高;泉州的保水与食物供给之间的权衡关系加剧,幅度大于同样加剧的漳州。

三个城市中,厦门的城市化速度最快,程度最高,漳州的城市化程度最低,快速的城市化过程导致了厦门的生态系统服务降低较为明显,支持服务于调节服务同供给服务之间的权衡关系偏高且加剧;漳州市的生态环境状况相对优于另外两个城市,且生态农业较为发达,因此权衡关系相对另外两个城市较低。

表 2 厦漳泉 3 市生态系统服务权衡关系变化对比
Table 2 The comparison of ecosystem service trad-offs in the three cities

地区 District 年份 Year	厦门			漳州			泉州		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015
保水与保土 Water and soil conservation	0.175	0.189	0.161	0.089	0.118	0.093	0.113	0.136	0.069
保土与 NPP Soil conservation and NPP	0.111	0.130	0.130	0.070	0.089	0.057	0.112	0.140	0.076
保水与 NPP Water conservancy and NPP	0.369	0.424	0.434	0.324	0.333	0.375	0.385	0.345	0.444
保水与食物供给 Water conservancy and food supply	-0.223	-0.218	-0.221	-0.192	-0.193	-0.194	-0.227	-0.232	-0.235
保土与食物供给 Soil conservation and food supply	-0.087	-0.097	-0.098	-0.193	-0.057	-0.052	-0.067	-0.078	-0.055
NPP 与食物供给 NPP and food supply	-0.178	-0.155	-0.148	-0.194	-0.116	-0.130	-0.158	-0.155	-0.184

3.2.3 晋江流域和九龙江流域之间的生态系统服务权衡关系对比

闽三角城市群主要存在九龙江流域和晋江流域两个流域,由于统计数据限制的原因,本文将厦门市和漳州市整体作为九龙江流域,泉州市作为晋江流域。两个流域在河流流量、地形等自然因素方面存在着较大的不同。在空间尺度上,晋江流域各项服务之间无论是权衡关系和协同关系都大于九龙江流域。在时间尺度上,各生态系统服务协同关系中,晋江流域各服务间整体呈现减小趋势,九龙江流域各服务间的协同关系整体呈现上升态势;在权衡关系中,晋江流域呈现出逐渐增强趋势,九龙江流域整体呈现上升态势,其中九龙江流域在 2010—2015 年间,各生态系统服务之间的权衡关系增幅较大。

表 3 晋江流域和九龙江流域生态系统服务权衡关系对比
Table 3 The comparison of ecosystem service trad-offs in Jinjiang Basin and Jiulongjiang Basin

地区 District 年份 Year	晋江流域 Jinjiang river basin			九龙江流域 Jiulong river basin		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015
保水服务-保土服务 Water and soil conservation	0.113	0.136	0.069	0.099	0.019	0.103
保土服务-NPP Soil conservation - NPP	0.112	0.140	0.076	0.068	0.021	0.067
保水服务-NPP Water conservancy -NPP	0.385	0.345	0.444	0.341	0.361	0.396
保水服务-食物供给 Soil conservation-food supply	-0.227	-0.232	-0.235	-0.130	-0.126	-0.130
保土服务-食物供给 Soil conservation-food supply	-0.067	-0.078	-0.055	-0.039	-0.007	-0.043
NPP-食物供给 NPP-food supply	-0.158	-0.155	-0.184	-0.122	-0.116	-0.133

3.3 不同情景下 2030 年闽三角城市群生态系统服务权衡分析

研究基于 Logistic-CA-Markov 模型,使用 IDRISI 17.0 软件模拟了 3 种不同情景(自然情景、规划情景和保护情景)下闽三角城市群 2030 年的土地利用类型。首先基于 2005 和 2010 年的土地利用类型,建立 Logistic-CA-Markov 模型,模拟 2015 年的土地利用类型,模型中各地类的 ROC 值均达到了 85%以上,并与 2015 年的土地利用现状进行对比,对比结果表明模型的准确率为 86.6%,表明模型具有较高的可信度。3 种模拟情景的设定规则为:自然情景设定依据现有发展规律,不对土地利用转换概率做改变;规划情景设定根据厦门、泉州、漳州 3 市的 2006—2020 年土地利用总体规划,统计到 2020 年林地、耕地以及建设用地等土地利用类型的面积控制范围,根据范围值设置模拟到 2020 年土地利用面积转移矩阵,并在此转换概率的基础上模拟 2030 年的土地利用类型;保护情景设定考虑到 3 个城市的土地利用总体规划的起始年份均为 2006 年,彼时的规划对生态环境保护的意识落后于当前,因此在该情景设定中对林地、耕地、水体和草地四种重要的生态用地类型的转换概率进行调整,设置林地、耕地和草地转换为建筑用地的面积降低 10%,并禁止水体转换为建筑用地。

根据相关研究成果^[12]以及研究区的具体情况,本文认为引起闽三角城市群生态系统服务发生变化的主要因素是快速城镇化所带来的土地利用变化,因此本文在估算 2030 年的生态系统服务功能时,以情景模拟得到的土地利用类型为基础,保持估算模型中的其他数据与 2015 年一致。2030 年的模拟结果显示,与 2015 年相比,在保护情景和规划情景下,水服务与保土服务、保水服务与 NPP 以及保土服务与 NPP 的协同关系都增

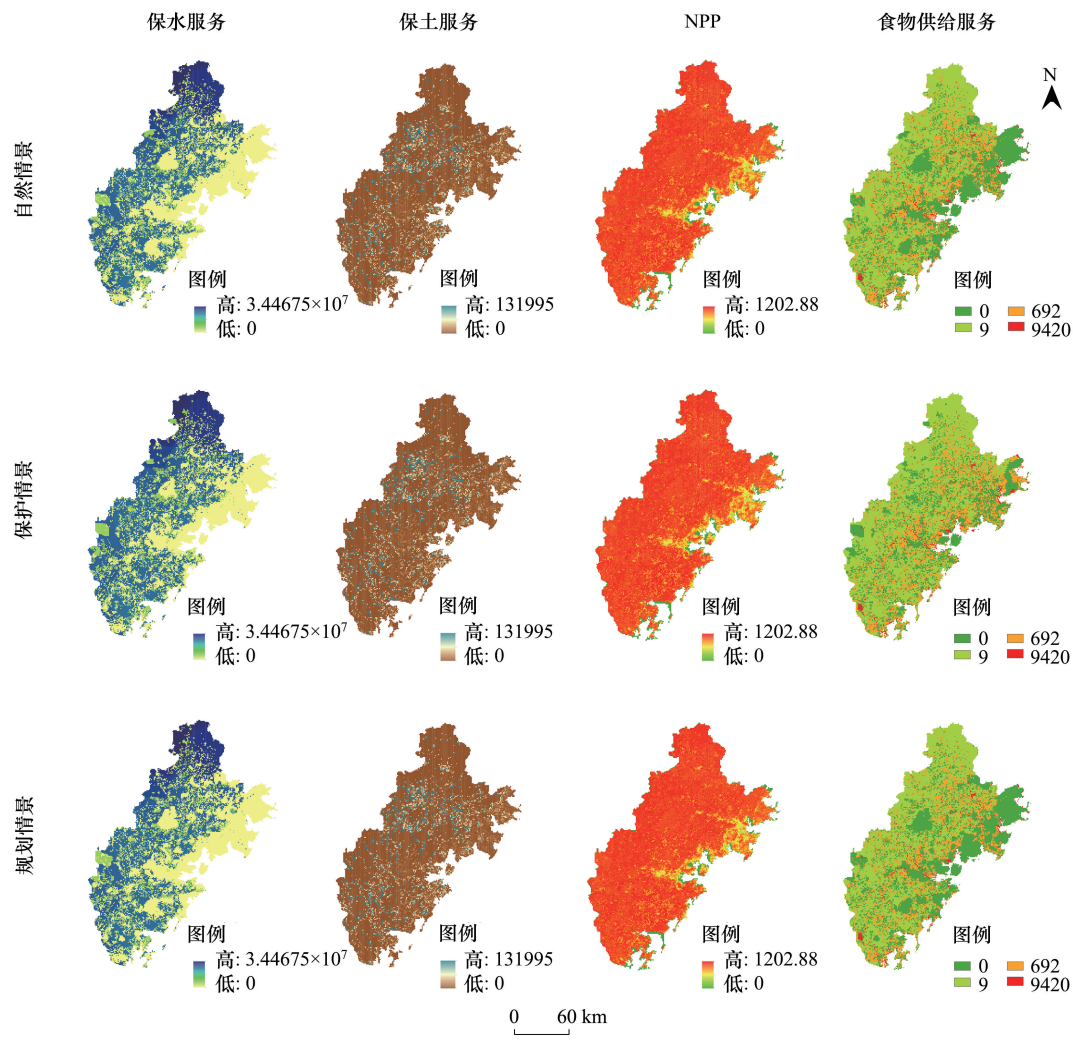


图 3 不同情景下 2030 年生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the ecosystem services in 2030 under different scenarios

强。保护情景与规划情景相比,生态系统之间的协同关系都有所提高,除 NPP 与食物供给的权衡关系加剧之外,其余权衡关系减轻。

4 结论

本文以快速城镇化背景下的闽三角城市群为研究区域,利用相关模型测算该地区保水服务、保土服务、NPP 和食物供给服务 4 种生态系统服务功能,使用相关分析、空间自相关和空间制图表达等方法分析其时空动态变化规律和相互之间的权衡协同关系,并基于不同情景对未来的生态系统服务权衡状况进行预测和分析。结果表明:2005—2015 年来,闽三角城市群的保水服务、保土服务、NPP 和食物供给服务 4 种生态系统服务功能均呈下降趋势;闽三角城市群的保水服务、保土服务与 NPP 这 3 种生态系统服务之间呈现相互增益的协同关系,食物供给服务与其他 3 种服务均呈此消彼长的权衡关系,在 2005—2015 年间,四种服务的权衡协同关系方向未变,权衡协同程度发生了复杂的变化;闽三角 3 个城市的生态系统服务权衡关系和协同关系均为厦门市>泉州市>漳州市,晋江流域的生态系统服务权衡关系高于九龙江流域,协同关系也高于九龙江流域;在所设定的自然情景下,4 种生态系统服务均出现大幅降低,生态系统服务之间的协同关系主要呈降低趋势,而权衡关系加剧;与规划情景相比,保护情景下的生态系统服务之间的协同关系更高,权衡关系更低。

5 讨论

本研究使用了较为常规的模型测算了生态系统服务功能,与以往相似的研究成果^[2,12]进行了对比,发现在食物供给与其他调节服务和支持服务呈现此消彼长的权衡关系方面具有较高的一致性,说明所使用的模型具有较高的科学性和适用性。近年来,闽三角城市群城市化

快速推进,建设用地大量占用耕地、林地与草地,在人类活动干预和自然灾害双重压力下,生态系统服务的结构与功能不断受损,总的生态系统服务价值不断降低,生态系统服务关系呈现权衡增强、协同弱化的特征。本文基于不同情景模拟闽三角城市群未来的生态系统服务权衡状况,根据情景模拟与分析的结果,建议政府应严格控制建设用地对林地、草地的侵占,通过保持林地、草地和水体的稳定来维持生态系统服务权衡关系的稳定和改善,进而保障区域的生态安全和可持续发展。研究目前所设定的情景主要是基于自上而下的原则,便于提供政策建议但是精准性不足,还欠缺基于所估算的生态系统服务功能状况进行自下而上的情景设定。文章目前还局限于生态系统服务的时空演变和不同生态系统服务功能之间的权衡协同分析,缺乏对生态系统服务供给与需求的权衡研究,生态系统服务供给与需求的平衡是生态系统能否为人类提供福祉的关键,该问题还需在接下来的研究中进行补充和深化。此外,生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务与文化服务,本文只研究闽三角城市群的调节服务和供给服务,今后应加强对文化服务和支持服务的探讨。

参考文献 (References):

- [1] Raymond C M, Singh G G, Benessaiah K, Bernhardt J R, Levine J, Nelson H, Turner N J, Norton B, Tam J, Chan K M A. Ecosystem services and beyond: using multiple metaphors to understand human\environment relationships. *Bioscience*, 2013, 63(7): 536-546.
- [2] 孙艺杰,任志远,赵胜男,张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. *地理学报*, 2017, 72(3): 521-532.
- [3] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- [4] 张宏锋,欧阳志云,郑华. 生态系统服务功能的尺度特征. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1432-1437.
- [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] 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.
- [7] Jacobs S, Wolfstein K, Vandenbruwaene W, Vrebas D, Beauchard O, Maris T, Meire P. Detecting ecosystem service trade-offs and synergies: A practice-oriented application in four industrialized estuaries. *Ecosystem Services*, 2015, 16(7): 378-389.
- [8] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [9] Berta M, Iniesta-Arandia I, García-Llorente M, Palomo I, Casado-Arzuaga I, Amo D G, Gómez-Baggethun E, Oteros-Rozas E, Palacios-Agundez I, Willaarts B, González J A, Santos-Martín F, Onaindia M, López-Santiago C, Montes C. Uncovering ecosystem service bundles through

- social preferences. *PLoS One*, 2012, 7(6): e38970.
- [10] Lamsal P, Pant K P, Kumar L, Atreya K. Sustainable livelihoods through conservation of wetland resources; a case of economic benefits from Ghodaghodi Lake, western Nepal. *Ecology and Society*, 2015, 20(1): 10.
- [11] Nappi A, Drapeau P, Saint-Germain M, Angers V A. Effect of fire severity on long-term occupancy of burned boreal conifer forests by saproxylic insects and wood-foraging birds. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(4): 500-511.
- [12] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [13] Yang W, Jin Y W, Sun T, Yang Z F, Cai Y P, Yi Y J. Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 354-366.
- [14] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [15] 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.
- [16] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [17] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259.
- [18] 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. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [19] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [20] Asadolahi Z, Salamanmahiny A, Sakieh Y, Mirkarimi S H, Baral H, Azimi M. Dynamic trade-off analysis of multiple ecosystem services under land use change scenarios: Towards putting ecosystem services into planning in Iran. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 250-260.
- [21] Cordingley J E, Newton A C, Rose R J, Clarke R T, Bullock J M. Can landscape-scale approaches to conservation management resolve biodiversity-ecosystem service trade-offs?. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(1): 96-105.
- [22] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D R, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [23] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男等. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. *地理学报*, 2017, 72(3): 521-532.
- [24] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [25] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [26] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. *生态学报*, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [27] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 胡熠娜. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. *地理科学进展*, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [28] 税伟, 白剑平, 简小枚, 祁新华, 苏正安, 陈勇, 蔡应君. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能. *生态学报*, 2017, 37(1): 277-285.
- [29] 税伟, 陈毅涛, 苏正安, 范水生. 专业化茶叶种植影响下的农业生态系统服务功能价值评价——以福建省安溪为例. *生态学报*, 2017, 37(10): 3311-3326.
- [30] 吴健生, 钟晓红, 彭建, 秦维. 基于生态系统服务簇的小尺度区域生态用地功能分类——以重庆两江新区为例. *生态学报*, 2015, 35(11): 3808-3816.
- [31] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [32] 刘绿怡, 刘慧敏, 任嘉衍, 卞子元, 丁圣彦. 生态系统服务形成机制研究进展. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2731-2738.
- [33] 熊鹰, 陈昊林. 基于属性理论的长株潭城市群生态系统健康评价. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1422-1427.
- [34] Palacios-Agundez I, Onaindia M, Barraqueta P, Madariaga I. Provisioning ecosystem services supply and demand: The role of landscape management to reinforce supply and promote synergies with other ecosystem services. *Land Use Policy*, 2015, 47: 145-155.
- [35] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, Frantzeskaki N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 146-158.
- [36] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价. *地理科学*, 2016, 36(4): 603-611.
- [37] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2100-2109.
- [38] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.
- [39] 赵磊, 袁国林, 张琰, 贺彬, 刘忠翰, 王志芸, 李靖. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 42-46.
- [40] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [41] 龚文峰, 袁力, 范文义. 基于 CA-Markov 的哈尔滨市土地利用变化及预测. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 216-222.
- [42] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 基于 CA-Markov 模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 346-352.
- [43] 廖江福, 唐立娜, 王翠平, 许通. 城市元胞自动机扩展邻域效应的测量与校准研究. *地理科学进展*, 2014, 33(12): 1624-1633.
- [44] 杨俊, 解鹏, 席建超, 葛全胜, 李雪铭, 马占东. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例. *地理学报*, 2015, 70(3): 461-475.