

DOI: 10.5846/stxb201907181523

兰紫橙, 贾岚, 程煜. 闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系. 生态学报, 2020, 40(12): 3909-3920.

Lan Z C, Jia L, Cheng Y. The ecosystem services evaluation and trade-off synergy in Min River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 3909-3920.

闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系

兰紫橙^{1,2}, 贾 岚^{1,2}, 程 煜^{1,2,*}

1 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

2 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

摘要: 探讨流域地区的生态系统服务功能对高效配置环境资源和合理制定生态环境政策具有重要意义。以闽江流域为研究对象, 利用 2006 年、2011 年、2016 年三期遥感影像提取闽江流域各个县市的耕地、森林、草地、水体、不透水地表和裸地等专题信息, 综合生态系统服务价值表、生态系统服务价值估算模型以及生态系统服务功能权衡协同模型, 评估闽江流域生态系统服务价值, 并分析该流域生态系统服务价值变化规律趋势及权衡协同关系。结果表明: 2006—2016 年闽江流域土地利用类型变化较大, 森林面积、耕地面积、不透水地表增多, 草地面积、水体面积、裸地面积减少, 水体面积变化最大; 生态系统服务价值总量由 2006 年的 101.12×10^9 元减少到 2016 年的 99.54×10^9 元。2006—2016 年, 闽江流域内各生态系统服务之间关系以协同关系为主导; 2011—2016 年, 协同关系占比显著提升, 但协同度有所降低。同期内, 闽江流域生态系统服务功能权衡协同的相似结果亦表现在闽江上游区域中, 可认为闽江上游区域作为城市化进程的“衍射区域”, 可有效地作为调整闽江流域生态系统服务关系的关键区域。

关键词: 生态系统服务; 价值评估; 权衡协同; 闽江流域

The ecosystem services evaluation and trade-off synergy in Min River Basin

LAN Zicheng^{1,2}, JIA Lan^{1,2}, CHENG Yu^{1,2,*}

1 Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Exploring the ecological service functions in the basin area is of great importance in efficient allocation of environmental resources allocation and rationally environmental policy design. Based on the model of the ecological service value proposed by Costanza, the Min River Basin is taken as the research object and the remote sensing images of 2006, 2011 and 2016 are used to extract information about the water, forest, grassland, cultivated land, impervious surface and bare land. By integrating ecosystem service value table, ecosystem service value estimation model and ecosystem service function trade-off coordination model, the ecosystem service value in the Min River basin and its trend were analyzed, then the trade-off synergy was explored. The results showed that the land-use system in the Min River basin significantly changed in 2006—2016, with increasing forest area, cultivated land area and impervious surface, as well as decreasing grassland area, water area and bare land area, especially with the most significant changes of water area. The overall value of the ecosystem services decreased from 101.12×10^9 yuan in 2006 to 99.54×10^9 yuan in 2016. The relationship between the ecosystem services in the Min River basin was mainly dominated by synergies in 2006—2016 and the share of synergies increased significantly during 2011—2016, while the synergy degree gradually decreased from 2011. Similarly, the results of the trade-off of ecosystem services in the Min River basin were also shown in the upper reaches during this period. It

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502900); 福建省科学技术厅民生科技专项(2017Y6002)

收稿日期: 2019-07-18; **修订日期:** 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengyu76@163.com

means that the upper reaches can be regarded as a “diffraction region” in the urbanization progress, and also treated as one of the key regions to effectively adjust the relationship between ecosystem services for the Min River basin.

Key Words: ecosystem service; evaluation; trade-off synergy; Min River Basin

生态系统服务指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[1]。联合国千年评估认为,生态系统服务来源于自然生态系统以及人类改造的生态系统^[2]。生态系统服务的可持续供给与经济社会可持续发展相辅相成^[3]。全球范围内近百年来调查数据显示,生态系统服务出现明显退化的比例高达 60%^[4],其主要原因是生态系统服务价值认识不足,继而导致的盲目开发^[5]。开展生态系统服务价值评估及权衡协同关系的研究,是生态系统保护和管理的根本^[6],对于明确各类生态系统的重要性、合理划定生态功能区、完善生态建设规划等具有重要意义。

1997 年, Daily 主编的《Nature's services: societal dependence on natural ecosystems》的出版,在全球范围内引起了生态系统服务研究者的广泛关注^[7]。国内外学者从生态系统功能监测、价值化评估及土地利用变化对生态系统服务的影响等方面开展了大量的研究^[8],其中,伴随着社会经济变化革新的驱动^[9],土地利用方式正在发生快速转变^[10-12],土地利用变化及生态系统服务量化评价研究受到热捧^[13],成为全球变化研究的时代命题。国外诸多学者认为,生态系统服务价值评估是考察自然资源的关键方法^[14]。Costanza 在全球范围内开展生态系统服务价值研究,运用不同方法计算得出全球生态系统服务的平均年度价值相当于全球国民生产总值的 1.8 倍^[15]。2003 年联合国千年生态系统评估项目开展的“生态系统与人类福祉”的研究,建立了生态系统服务功能从学术研究向实践应用转变的桥梁,迄今为止,该项目在相关评估工作中规模最大^[16]。在国内,相关研究起步晚,但近年来发展速度较快^[17]。谢高地等借鉴前人的研究成果,构建了符合中国陆地生态系统的服务价值表,并将其应用在青藏高原等地的研究中^[18]。同时,他还归纳出针对我国农田生态系统的单位面积生态服务价值量表,认为自然生态过程和包括种植业活动过程在内的人为过程对我国农田生态系统中的协同作用存在影响^[19]。欧阳志云等对生态系统服务功能的研究趋势以及生态系统服务功能价值的评估方法等方面进行了系统地分析梳理,并开展生态系统服务功能及其与可持续发展研究的关系的探讨^[20]。在流域区域生态系统方面,开展多维度研究为生态评价指标体系建立及对流域生态系统生态补偿机制构建提供了参考依据^[21]。

在以往的生态系统服务价值研究进展过程中,对各类生态系统服务之间的关系研究重视不足,实际上,各类生态系统服务之间相互影响,往往表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系^[22]。目前,探究生态系统服务之间的潜在联系,已经成为生态系统服务研究的热点,国内外学者对于生态系统服务权衡与协同关系成果涉及时空尺度效应、研究方法、驱动机制等^[23-30]。李双成分别在生态系统服务的共时性、驱动机制以及生态规划等方面的识别和分辨给出指导意见^[31]; Hong Liu 从生境质量与各生态指标之间的权衡与协同关系入手,探究了热带城市沿海地区生态系统服务与未来城市发展之间的权衡关系^[32]; 戴尔阜等对未来生态系统权衡与协同的发展趋势及研究内容进行了前瞻性展望^[33]; 傅伯杰和于丹丹通过对生态系统服务权衡及区域集成方法的研究,提出生态系统服务之间的消长和权衡具有尺度依赖性^[34]。尽管目前生态系统服务权衡与协同研究成果颇丰,但问题和局限仍然存在,权衡与协同研究多基于统计关系的数量分析,对于生态服务相关关系的动态趋势变化分析等方面依旧匮乏,区域内部空间的差异表达仍有待补充^[35]。

综上,迄今关于生态系统服务价值研究主要集中于森林、草地等陆地生态系统,流域区域生态系统服务功能的研究成果相对较少^[36],并且多聚焦于生态系统服务价值的评估,对同一区域内不同区间的权衡协同相对不足。同时,当前流域生态系统价值的研究成果主要集中于长江、珠江等知名江河流域,对闽江流域的研究尚少。闽江流域是福建省最大的河流,约占福建省面积的一半,其自然资源与生态安全牵动着福建省的国民经济和社会经济发展。为充分反映流域生态系统伴随土地利用方式变化,其生态系统服务效益的转化及人类赖

以生存的自然环境条件与效用的转变情况^[37],本文以闽江流域为例,开展流域生态系统服务价值评估,为优化土地利用提供依据,兼顾合理开发土地与提高生态效益两项任务,为经济社会可持续发展提供助力,并为福建省流域区域生态补偿等相关政策提供科学支撑。

1 研究区域和数据准备

1.1 研究区概况

闽江位于东经 116°23'—119°35',北纬 25°23'—28°16',是福建省第一大江,发源于建宁县均口镇,流经福州、三明、永安、邵武、南平、莆田、建宁等 33 个县、市,横贯福建东西,全长 2959 km,干流全长 577 km;流域土地总面积为 609160 万 hm²,占福建省土地总面积的 50.1%^[31](图 1)。闽江流域上中游地区多属于经济欠发达地区,包括三明、南平等部分县市,下游的福州市则经济较为发达。闽江下游地区包括福州的永泰、福清、闽清、闽侯、长乐、连江以及泉州德化),闽江中游包括南平的光泽、顺昌、松溪、政和、建阳、建瓯、浦城、邵武、武夷山以及宁德屏南、古田,闽江上游地区包括三明的建宁、宁化、清流、明溪、沙县、泰宁、将乐。



图 1 研究区地理位置

Fig.1 Research area location

1.2 数据采集与预处理

以闽江流域 2006、2011、2016 年 3 期陆地卫星 (Landsat) 同一时相遥感影像作为基础数据,在遥感软件 ENVI 5.2 支持下配准,进行遥感影像预处理、辐射纠正等。在 GIS 的支持下,以栅格影像为背景,提取专题数据,并参考全国土地利用分类方法,将闽江流域用地类型分为 6 类,分别是耕地、森林、草地、水体、不透水地表及裸地。应用 ArcGIS 10.2 软件属性表的空间计算功能,统计闽江流域 6 类土地利用类型的面积,得到闽江流域 2006、2011、2016 年土地利用分类,折合闽江流域上中下游地区出各用地类型的面积,在此基础上进行生态系统服务价值的评估。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值估算

2.1.1 生态系统服务功能分类

采用千年生态系统评估(MA)的方法对生态系统服务功能进行分类,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务 4 大类,进一步细分二级分类,包括食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、维持生物多样性和提供美学景观等 11 种服务功能。其中,本研究根据闽江流域研究区实际情况,选取其中 9 类服务功能,即食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、水文调节、净化环境、保持土壤、维持生物多样性、提供美学景观 9 项生态系统服务价值进行评估分析。

2.1.2 单位面积生态服务价值表

参考谢高地团队的生态系统分级标准的基础上,根据需要将土地利用数据分类进行调整。为了表述的准确性,本文将生态系统中的农田、森林、草地、水体和荒漠依次对应于土地利用类型中的耕地、森林、草地、水体和裸地,并在此基础上加上不透水地表(图 2、图 3、图 4)。分别计算不同土地利用类型所占面积(表 1)。结合研究区实际情况,参考邓雨薇^[38]构建的不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表,最终得到闽江流域不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表^[18,38](表 2)。

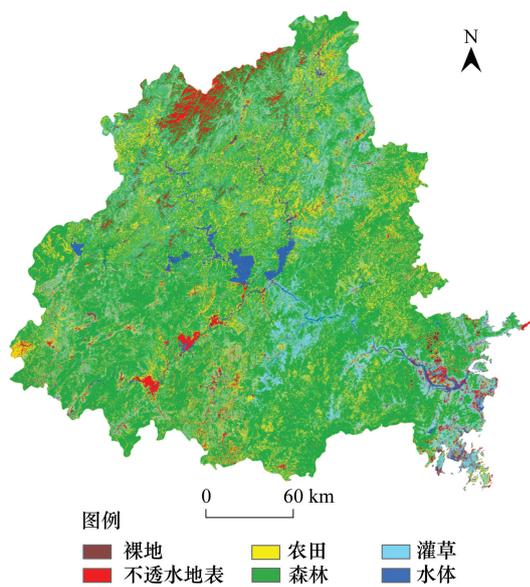


图 2 2006 年闽江流域土地利用分类图
Fig.2 Land use classification map of Min River Basin in 2006

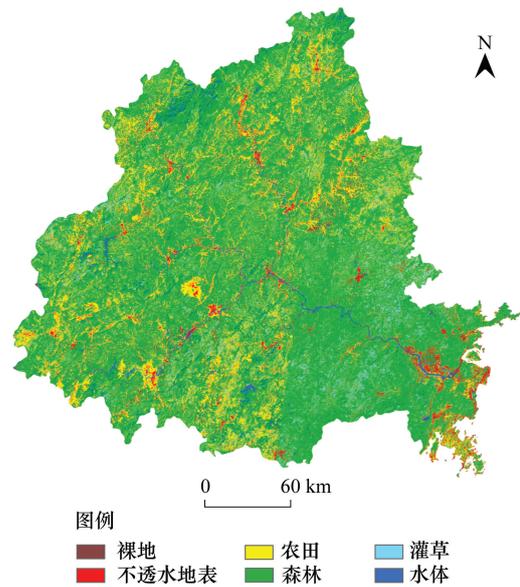


图 3 2011 年闽江流域土地利用分类图
Fig.3 Land use classification map of Min River Basin in 2011

表 1 闽江流域不同土地利用类型面积统计/hm²

Table 1 Areas of land use types in the Min River Basin

土地利用类型 Land use type	2006	2011	2016	土地利用类型 Land use type	2006	2011	2016
耕地 Farmland	905306.5	1001766	1160709	水体 Water	341591.9	219759.2	71789.85
森林 Vegetation	3690983	4324744	4426959	不透水地表 Urban	243006.2	195798	245522.5
草地 Grass land	1224670	654556.3	591737.3	裸地 Bare land	136530.1	145463.6	45369.81

2.1.3 生态系统服务价值估算模型

以闽江流域不同土地利用类型单位面积为主要数据源,结合表 2 闽江流域不同生态系统单位面积生态服

务价值表,计算得到闽江流域不同年份生态系统服务单位面积价值量。估算模型如公式^[39]:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (S_i \times V_i) \tag{1}$$

式中,ESV 表示生态系统服务价值总量; S_i 表示研究区第 i 类土地利用类型面积(hm^2), V_i 表示第 i 类土地利用类型的单位面积生态系统服务价值($元/hm^2$); i 表示土地利用类型。

2.2 生态系统服务权衡协同度

为对研究区进行权衡协同情况分析,对其生态系统服务变化量间的相互作用进行评价,从方向及程度两方面反映各服务功能间相互作用,运用以数据线性拟合为基础建立的生态系统服务权衡协同度(ESTD),公式如下^[40]:

$$ESTD_{ij} = \frac{ESC_{ib} - ESC_{ia}}{ESC_{jb} - ESC_{ja}} \tag{2}$$

式中, $ESTD_{ij}$ 表示第 ij 种生态系统服务权衡协同度; ESC_{ib} 表示 b 时刻第 i 种生态系统服务的变化量; ESC_{ia} 表示 a 时刻第 i 种生态系统服务的变化量。 $ESTD_{ij}$ 代表某两种生态系统服务变化量相互作用的程度和方向。为负值时,表示第 i 与 j 种生态系统服务为权衡关系;为正值时,表示两者之间为协同关系。绝对值代表相较于第 j 种生态系统服务的变化,第 i 种生态系统服务变化的程度。

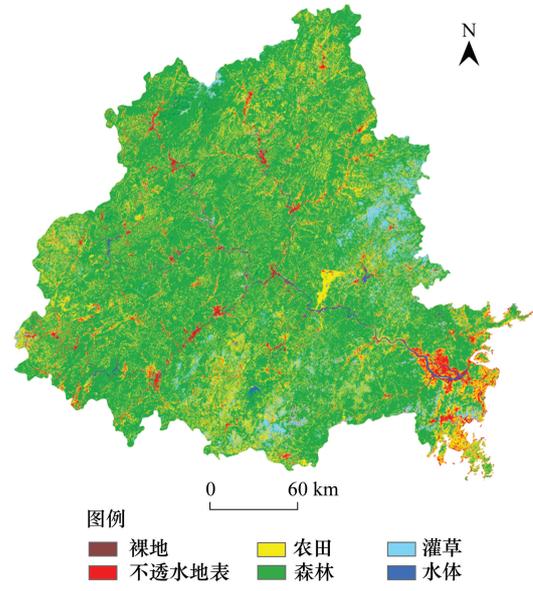


图 4 2016 年闽江流域土地利用分类图

Fig.4 Land use classification map of Min River Basin in 2016

表 2 闽江流域不同生态系统单位面积生态服务价值/(元/hm²)

Table 2 Ecological service value per unit area of different terrestrial ecosystems in Min River Basin

服务类型 Type of service		生态服务价值 Ecological service value					
一级分类	二级分类	耕地	森林	草地	水体	不透水地表	裸地
供给服务	食物生产	884.9	88.5	265.5	88.5	82.6	8.8
Supply service	原材料生产	88.5	2300.6	44.2	8.8	—	—
调节服务	气体调节	442.4	3097	707.9	407	—	—
Adjustment Service	气候调节	787.5	2389.1	796.4	407	—	—
	水文调节	530.9	2831.5	707.9	18033.2	260.3	26.5
	净化环境	1451.2	1159.2	1159.2	16086.8	86.8	8.8
支持服务	保持土壤	1291.9	3450.9	1725.5	8.8	—	17.7
Support Service	维持生物多样性	628.2	2884.6	964.5	2203.3	—	300.8
文化服务	提供美学景观	8.8	1132.6	35.4	3840.2	82.6	8.8
Cultural service							

“—”表示缺乏数据或无此项生态服务功能

3 结果与分析

3.1 闽江流域生态系统服务

3.1.1 单项生态服务功能价值及其变化

2006、2011、2016 年 3 个时期生态系统单项服务价值所占比例如图 5。从生态系统单项服务价值 3 个时期的整体结构看,土壤保持功能占 17.12%,净化环境功能占 15.03%,气体调节功能、维持生物多样性功能分别占 14.33%,三者所占比例最高,之和超过了总价值的 60.81%。其次,气候调节功能占 11.12%、水文调节功

能占 12.45%，二者服务价值也占很大比例，均超过了 10.00%。

2006、2011、2016 年 3 个时期中，生态系统单项服务价值年际变化情况如图 6。从生态系统服务总价值结构不同时期单项服务价值情况来看，2006 年到 2016 年，原料生产功能、气体调节功能、气候调节功能、土壤保持功能均呈现稳步上升趋势；在净化功能服务价值中，2011 年呈现出峰值，为 17.26×10^9 元；提供美学景观功能价值基本持平，维持在 5.56×10^9 元；而水文调节功能与食物生产功能服务价值变化较大，分别从 2006 年的 17.26×10^9 元和 4.44×10^9 元下降至 2016 年的 8.66×10^9 元和 1.60×10^9 元。

如表 3，供给服务中，食物生产功能服务价值呈现由 2006 年至 2016 年逐渐呈现降低的趋势，且平均变化率绝对值高达 66.71%，原料生产功能服务价值却呈现出略微上升形式，其中食物供给功能以及原材料生产功能与农业用地面积、林业用地面积的变动存在联系。

调节服务中，服务价值总体呈现上升趋势，其中部

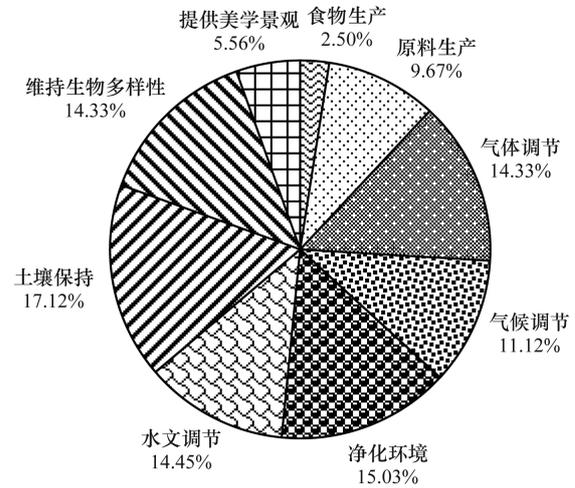


图 5 单项生态系统服务价值占比

Fig.5 Percentage of the value of individual ecosystem services in 2006—2016

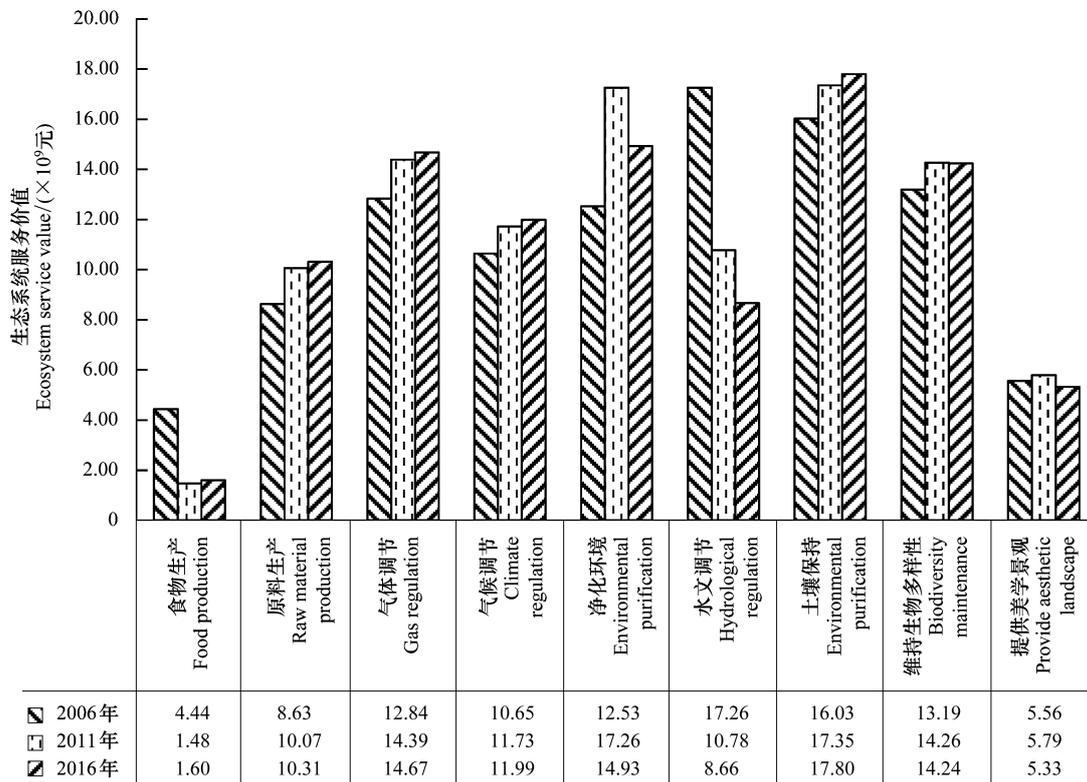


图 6 单项生态系统服务价值变化

Fig.6 Changes in the value of individual ecosystem services

分功能服务价值呈现下降趋势。气候调节功能服务价值与气体调节功能服务价值的平均变化率均呈现出先较迅速增长，后缓慢增长趋势，这与林业用地的变化存在一定关联，森林在气体气候调节中占据主导地位。调节水文功能服务价值在两个时期内均呈现出下降趋势，这与水体资源的减少密切相关。净化调节功能服务价

值在第一时期内上升,第二时期内下降,与林业用地的面积的变动息息相关。闽江流域下游地处东南沿海地区,而上游地区地处内陆,因而自身水气调节功能存在上下游差异。

支持服务中,对比观察发现,三年中其变化较为平缓,土壤保持功能和维持生物多样性功能的价值量变化不大,维持生物多样性功能服务价值呈现第一时期增长,第二时期下降的形式,这与区域内部景观破碎度加大、破坏生物多样性行为密不可分。

文化服务中,提供美学景观功能服务价值的变化在第一时期内上升,第二时期内下降,但其变化率很小,提供美学景观功能服务价值变化不大,三个时期内基本保持一致。

2006年、2011年以及2016年,闽江流域GDP值分别为 260.83×10^9 元、 598.11×10^9 元、 974.72×10^9 元,而同期生态系统服务总价值分别为 101.12×10^9 元、 103.12×10^9 元、 99.54×10^9 元。GDP值分别为生态系统服务总价值的2.6、5.8、9.8倍。是由于闽江流域经济较为发达,第三产业发展较快,有限的国土面积导致所提供的产品和服务是不足。GDP呈现上升趋势的同时,生态系统服务总值却呈现略微下降,由此看出,GDP发展与生态系统服务价值之间未呈现良好的协同发展势态。

表3 闽江流域生态系统服务价值/($\times 10^9$ 元/hm²)

Table 3 The value of ecosystem services in the Min River Basin

项目 Project	功能 Function	年份 Years			平均变化率/% Average rate of change	
		2006	2011	2016	2006与2011年	2011与2016年
供给服务 Supply service	食物生产	4.44	1.48	1.60	-66.70	8.32
	原料生产	8.63	10.07	10.31	16.69	2.43
调节服务 Adjustment Service	气体调节	12.84	14.39	14.67	12.09	1.96
	气候调节	10.65	11.73	11.99	10.21	2.21
	净化环境	12.53	17.26	14.93	37.74	-13.49
	水文调节	17.26	10.78	8.66	-37.54	-19.63
支持服务 Support Service	土壤保持	16.03	17.35	17.80	8.28	2.57
	维持生物多样性	13.19	14.26	14.24	8.14	-0.15
文化服务 Cultural service	提供美学景观	5.56	5.79	5.33	4.08	-8.02
总计 Total		101.12	103.12	99.54	1.97	-3.47

3.1.2 上中下游生态系统服务价值及其变化

为了研究在城市化进程中,伴随土地利用变化对闽江流域生态系统服务之间相互关系的影响,本文将闽江流域分区为上游、中游、下游3个部分,分别评估3个分区内生态系统服务价值。可以发现,以空间视角看,三年平均生态系统服务价值呈现上游>中游>下游现象,从纵向角度出发,对比各分区间生态系统服务价值,上游流域与中游流域内生态系统服务价值逐年增加,与其农业用地以及林业用地广布存在紧密联系;下游流域内生态系统服务价值先出现上升情况后又呈现下降趋势。其中,供给服务中,食物生产功能服务价值在三个分区内均高于中游、下游地区,下游区域食物生产功能服务价值一直处于较低的情况;原料生产功能服务价值中,上游区域仍为占主导地位,且其价值均为下游地区的2倍以上。调节服务中,气候调节功能服务价值、气候调节功能服务价值水文调节均以上游、中游区域提供为主。支持服务中,土壤保持功能服务价值在2006年、2011年、2016年间,在上游、中游地区逐年上升,在下游区域2006年到2011年间略微上升,2011年到2016年间下降,2016年价值量略低于2006年;维持生物多样性功能服务价值的变化情况与土壤保持功能服务价值变化情况基本一致。文化服务中,提供美学景观功能服务价值变化在上游地区表现不明显,基本维持不变,其变化在中游、下游区域表现明显,中游区域提供美学功能服务价值变化较大,2016年价值量约为2006年价值量的1.78倍,下游区域内,2006年的价值量与2016年的价值量基本持平,但在2011年上升较多。多由于自然用地功能转换,带来的面积缩小引起。主要是由于下游地区多处于经济发达区,林业农业用地相对

于其他两个区域较少,建设用地面积大,因此生态系统服务价值低(表4)。

表4 各分区生态系统服务价值/($\times 10^9$ 元/hm²)

Table 4 Value of ecosystem services in each district in 2006, 2011 and 2016

年份 Years	分区 Partition	功能 Function									总计 Total
		食物生产 Food production	原料生产 Raw material production	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水文调节 Hydrological regulation	净化环境 Environmental purification	土壤保持 Soil conservation	维持生物 多样性 Biodiversity maintenance	提供美 学景观 Provide aesthetic landscape	
2006	上游 Upstream	7.44	37.19	56.25	47.18	87.18	63.67	71.20	58.93	25.82	454.86
	中游 Midstream	5.08	31.99	46.98	38.66	61.68	41.18	57.99	47.69	19.65	350.91
	下游 Downstream	2.52	17.10	25.14	20.61	31.39	20.44	31.06	25.37	10.18	183.81
2011	上游 Upstream	6.98	46.71	66.75	54.48	77.00	47.47	77.53	65.89	26.19	468.99
	中游 Midstream	5.62	34.07	48.88	40.14	63.72	41.86	59.17	49.16	20.67	363.29
	下游 Downstream	2.21	19.92	28.27	22.70	31.88	18.47	32.25	27.91	26.11	209.70
2016	上游 Upstream	7.04	49.40	69.96	56.87	70.37	39.89	84.28	67.69	25.43	470.91
	中游 Midstream	5.64	37.23	52.62	42.89	53.26	30.50	63.39	50.90	34.95	371.37
	下游 Downstream	3.35	16.52	24.14	20.15	25.66	16.40	30.32	23.82	8.78	169.15

3.2 生态系统服务权衡协同

3.2.1 单项生态系统服务功能间权衡协同关系

为进一步探究不同时间段生态系统服务之间相互作用的程度和方向,对闽江流域生态系统服务间的关系进行数量化评估,本研究应用生态系统服务协同度模型(ESTD)。

由表5可知,2006—2011年,闽江流域生态系统服务功能间的权衡协同关系中各生态系统服务之间组成72组值,其中包括10组为负值,62组为正值,协同关系占86.11%,表明在闽江流域生态系统服务之间,协同关系是主导关系。权衡关系主要表现在气体调节功能和各服务功能之间,表明气体调节功能与各服务功能之间存在“此消彼长”的情况。在协同关系中,水文调节功能与土壤保持功能(-21.30)的权衡度最高。协同度呈现出比较平稳的趋势,其中,食物生产功能与提供美学景观功能(0.26)协同度最低,净化环境功能与美学环境功能(1.40)协同度最高。

2011—2016年,闽江流域生态系统服务功能间的权衡协同关系中各生态系统服务之间组成72组值,其中2组为负值,70组为正值,协同关系占97.22%,表明闽江流域生态系统服务功能之间的主导关系仍旧为协同关系。权衡关系与2006—2011年间情况相比,从10组降低至2组,表现在原料生产功能与净化环境功能(-0.43)之间,这两者呈现出此消彼长的状态。其余服务功能之间均呈现协同关系,且协同程度均呈现出一种平稳态势,最小值为气候调节功能与净化环境功能(0.29)气体调节功能与维持生物多样性功能(0.29)之间,协同程度不明显。最大值存在于水文调节功能与气体调节功能(11.13)之间。

对比两期数据间的权衡协同关系可以发现,土地利用类型虽有所转变,但各服务之间的主导关系仍属于协同关系,并且协同关系所占比例显著提升,然而协同度的最大值呈现减小趋势,表明在该区域内的生态系统服务功能一直处于相互促进、同增同减关系,但此种相关关系程度有所减弱。

3.2.2 上游生态系统服务价值权衡协同关系

如表6,2006—2011年,闽江流域上游流域分区中,生态系统服务功能间的权衡协同关系中各生态系统服务之间组成72组值,其中10组为负值,62组为正值,协同关系占86.11%,协同关系占上游分区主导地位。协同关系主要集中在土壤保持功能和水文调节功能之间。在供给服务中,食物生产功能与原料生产功能之间呈现协同关系(0.75),且食物生产功能以及原料生产功能与其余服务功能之间均呈现一定的协同关系。其中,原料生产功能与净化环境功能(34.83)呈现极大的协同度。调节服务中,净化环境功能与气体调节功能

(-0.38)以及净化环境功能与气候调节功能(-2.35)之间呈现权衡关系,其余服务功能间均呈现协同关系,其中,水文调节功能与气体调节功能(3.02)协同度最大。在调节服务功能与其余功能中,水文调节功能与土壤保持功能(-30.42)出现较大的权衡度。文化服务中,提供美学景观功能与其他服务功能均为相互增益的协同关系。其中,与净化环境功能、水土保持功能之间的协同关系略高于其余服务功能。

表 5 各生态系统服务权衡与协同关系

Table 5 Trade-offs and synergies between ecosystem services

功能 Function	食物生产 Food production	原料生产 Raw material production	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水文调节 Hydrological regulation	净化环境 Environmental purification	土壤保持 Soil conservation	维持生物 多样性 Biodiversity maintenance	提供美 学景观 Provide aesthetic landscape
2006—2011									
食物生产 Food production		0.49	0.65	0.60	0.87	0.86	0.73	0.68	0.26
原料生产 Raw material production			0.97	1.21	5.49	1.31	1.02	1.09	0.72
气体调节 Gas regulation				0.82	-0.04	-1.98	1.08	-2.80	0.85
气候调节 Climate regulation					-1.98	1.34	0.96	1.01	0.86
净化环境 Environmental purification						1.34	0.53	0.19	1.40
水文调节 Hydrological regulation							-21.30	1.61	1.09
土壤保持 Soil conservation								0.92	0.90
维持生物多样性 Biodiversity maintenance									0.90
提供美学景观 Provide aesthetic landscape									
2011—2016									
食物生产 Food production		0.99	0.99	0.99	1.32	1.18	0.98	1.01	1.16
原料生产 Raw material production			0.99	0.99	-0.43	1.56	0.97	1.07	0.86
气体调节 Gas regulation				0.99	0.60	11.13	0.95	0.29	0.92
气候调节 Climate regulation					0.29	1.88	0.97	1.12	0.89
净化环境 Environmental purification						1.03	0.72	0.62	1.49
水文调节 Hydrological regulation							0.03	4.35	1.19
土壤保持 Soil conservation								0.87	0.93
维持生物多样性 Biodiversity maintenance									0.59
提供美学景观 Provide aesthetic landscape									

2011—2016年,闽江流域上游流域分区中,生态系统服务功能间的权衡协同关系中各生态系统服务之间组成72组值,其中0组为负值,72组为正值,协同关系占100.00%,协同关系显著。各生态系统服务功能协同度差异不大,协同度指标均在0.63—1.18之间,其中,食物生产功能与净化环境功能(1.18)协同度相对最大,原料生产功能与土壤保持功能(0.63)协同度相对较小。由数据可知,2011年到2016年间,所有生态系统服

务功能之间均为相互增益的协同关系。

表 6 上游区域权衡协同关系

Table 6 Upstream regional trade-off synergy between 2006 and 2016

功能 Function	食物生产 Food production	原料生产 Raw material production	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水文调节 Hydrological regulation	净化环境 Environmental purification	土壤保持 Soil conservation	维持生物 多样性 Biodiversity maintenance	提供美 学景观 Provide aesthetic landscape
2006—2011									
食物生产 Food production		0.75	0.82	0.84	0.80	1.14	0.90	0.87	0.96
原料生产 Raw material production			0.95	1.28	34.83	1.65	1.10	1.13	0.55
气体调节 Gas regulation				0.74	-0.38	3.02	1.39	-3.10	0.75
气候调节 Climate regulation					-2.35	1.78	1.04	1.03	0.76
净化环境 Environmental purification						0.80	0.25	-0.26	1.78
水文调节 Hydrological regulation							-30.42	2.54	1.21
土壤保持 Soil conservation								1.05	0.88
维持生物多样性 Biodiversity maintenance									0.83
提供美学景观 Provide aesthetic landscape									
2011—2016									
食物生产 Food production		0.95	0.90	0.94	0.79	0.96	0.97	0.98	0.98
原料生产 Raw material production			1.01	1.10	1.18	1.00	0.63	1.04	0.92
气体调节 Gas regulation				0.95	0.97	0.97	0.97	1.00	0.99
气候调节 Climate regulation					1.10	1.01	1.00	1.18	1.04
净化环境 Environmental purification						0.95	0.98	1.47	1.02
水文调节 Hydrological regulation							0.99	0.83	1.07
土壤保持 Soil conservation								0.94	0.81
维持生物多样性 Biodiversity maintenance									0.97
提供美学景观 Provide aesthetic landscape									

对比两期上游区域的数据可发现,区域内生态系统服务的关系由协同关系为主,权衡关系为辅转变为协同关系主导,协同度虽未增加,但协同关系比例明显上升。表明在闽江流域上游地区,如三明的建宁、宁化、清流、明溪、沙县、泰宁、将乐等地区,虽然经济发展情况随不如中下游地区,但生态系统服务功能之间的关系呈现往协同方向发展趋势,有利于区域的可持续发展。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 2006—2016 年闽江流域土地利用类型变化明显,闽江流域主要土地类型为耕地、林地及草地。土地利用变化总体趋势为森林面积、耕地面积增多,增多量达 255202.51hm²,变化率为 28.21%;而草地面积、水体

面积、裸地面积减少,水体面积减少量最大,为 269802.05 hm^2 ,变化率为-78.98%;不透水地表面积保持基本略微上升态势。

(2)闽江流域生态系统服务价值由 2006 年的 101.12×10^9 元减少到 2016 年的 99.54×10^9 元,闽江流域生态系统服务价值呈下降趋势。草地、水体、裸地向耕地、森林、不透水地表转化,水体生态系统服务价值高,其面积减少最大,远超过森林面积以及耕地面积的增加量,因而整体生态系统服务价值减少。

(3)2006—2011 年,闽江流域内单项生态系统服务功能间以协同关系为主导,协同关系占 86.11%;2011—2016 年,单项生态系统服务功能间的关系仍为协同状态,并且协同关系占比上升至 97.22%,说明闽江流域内各项生态系统服务功能在土地利用变化、人为干扰等外部因素的影响下,两种甚至更多的生态系统服务同步增强或是减弱。土地利用方式对土地覆被状况产生直接影响,不同土地利用类型带来不同的权衡协同情况。

(4)2006—2016 年,闽江流域上、中、下游的协同关系一直处于主导地位,并且协同关系占比上升,由 86.11% 上升至 100.00%。上游的权衡协同情况与整个闽江流域的权衡协同情况相似,可认为闽江上游区域作为城市化进程的“衍射区域”,可有效地作为调整闽江流域生态系统服务作用关系的关键区域。

(5)伴随闽江流域经济发展,城市化建设的推进,导致流域生态系统服务价值的整体下降。因此要着重调和社会经济发展与生态环境保护之间的矛盾。

4.2 讨论

本研究中,闽江流域生态系统服务价值整体随年际变化而减少,生态系统服务价值对土地利用变化表现出了较强的敏感性。生态系统服务价值评估具有相当大的复杂性^[41-42]。一方面,必须明确评估生态系统服务价值不是给闽江流域一个绝对准确的价格标签,重要的是探究土地利用演变过程中生态系统服务价值的变化^[43]。生态系统服务价值评估结果和价值边际变化映射的土地利用格局演化同等重要。另一方面,闽江流域承担着为闽江流域内上中下游各县市乃至全省提供生态产品的艰巨重任,如若其生态系统服务退化和丧失将直影响土地利用结构优化配置^[44]和人类福祉。因此,在土地资源利用本地化模式时,明确“生态优先”发展定位的主攻方向,找准经济发展与林地、耕地、草地等生态资产保护的契合点,配套建立并发挥生态补贴政策的联动效能,是谋求闽江流域可持续发展的根本路径^[45]。在对闽江流域权衡协同情况分析中,土地利用方式的改变直接影响生态系统服务差异及不同的权衡协同情况。在生态系统服务高值区域(上游)、次高值区域(中游)及低值区域(下游)采取不同对策:闽江流域上游,发挥着重要的生态服务功能,后续管理中,应继续将其作为生态功能区重点保护区域,禁止随意开发;闽江流域中游,同样限制过度建设开发;闽江流域下游,受到人类活动扰动较大,土地利用管理不能“一刀切”,兼顾生态效益,根据下游区域不同区块的实际情况推进农林改造,提高耕地和经济林地的生产效率,杜绝低水平扩张,避免水土流失加剧导致生态效益降低。本文选取闽江流域上游中游下游三个自然区划中生态系统服务价值总量最高的上游区域中生态系统服务功能进行了权衡协同分析,与闽江流域整体权衡协同情况进行对比,并未对中游、下游区域进行权衡协同研究以及未对三个区划之间的权衡协同情况做进一步研究。在接下来的研究中有必要基三个分区间探讨生态系统服务权衡与协同关系的动态变化及影响因素,从而提出更加精准的土地管理政策,为优化配置生态服务之间的关系,协调人口、生态、环境可持续发展提供科学依据。本研究中生态系统服务功能的选取主要是参考国内外的研究成果并充分考闽江流域的基本情况,其合理性与适用性仍有待更加深入的探究。对于如何优化完善生态系统服务价值评估的技术和方法,是未来迫切需要解决的问题。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Daily D C, 欧阳志云, 郑华, 李树苗, 王玉宽, Feldman M, Kareiva P, Polasky S, Ruckelshaus M. 保障自然资本与人类福祉: 中国的创新与影响. 生态学报, 2013, 33(3): 669-685.
- [3] 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.
- [4] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, 23(6): 2-9.

- [5] 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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [6] 王亚楠, 杨海峰, 税伟. 闽三角城市群生态系统服务价值核算及权衡协同关系//2018'中国土地资源科学创新与发展暨倪绍祥先生学术思想研讨会论文集. 南京: 中国自然资源学会土地资源研究专业委员会, 中国地理学会农业地理与乡村发展专业委员会, 2018: 11-11.
- [7] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191-199.
- [8] 程敏, 张丽云, 崔丽娟, 欧阳志云. 滨海湿地生态系统服务及其价值评估研究进展. *生态学报*, 2016, 36(23): 7509-7518.
- [9] 杨清可, 段学军, 王磊, 金志丰. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例. *地理科学*, 2018, 38(1): 97-106.
- [10] 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.
- [11] 王航, 秦奋, 朱筠, 张传才. 土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2017, 37(4): 1286-1296.
- [12] 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 苏常红, 姚雪玲, 刘宇. 国际景观生态学研究新进展. *生态学报*, 2008(2): 798-804.
- [13] Long H L, Liu Y Q, Hou X G, Li T T, Li Y R. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: implications for urban planning in the new developing area of China. *Habitat International*, 2014, 44: 536-544.
- [14] Loc H H, Irvine K N, Diep N T H, Quyen N T K, Tue N N, Shimizu Y. The legal aspects of Ecosystem Services in agricultural land pricing, some implications from a case study in Vietnam's Mekong Delta. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 360-369.
- [15] Sutton P C, Costanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 509-527.
- [16] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [17] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [18] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [19] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 645-651.
- [20] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-639.
- [21] 敦越, 杨春明, 袁旭, 杨燕平, 肖复晋, 梁斯琦, 陆颖. 流域生态系统服务研究进展. *生态经济*, 2019, 35(7): 179-183.
- [22] 傅伯杰, 田汉勤, 陶福祿, 赵文武, 王帅. 全球变化对生态系统服务的影响. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 14-18.
- [23] 吴昌华, 崔丹. 《千年生态系统评估》. *世界环境*, 2005, (3): 56-65.
- [24] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. *生态学报*, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [28] 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.
- [29] 李凯, 崔丽娟, 李伟, 康晓明, 张亚琼. 基于能值代数的湿地生态系统服务评价去重复性计算. *生态学杂志*, 2006, 35(4): 1108-1116.
- [30] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [31] 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.
- [32] Hong Liu, Mingxun Ren, Jennifer Richards, Xiqiang Song. Tropical China Plant Diversity, Ecology and Conservation: a Glimpse at the Current State. *The Botanical Review*, 2017, 83(1): 1-4.
- [33] 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.
- [34] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [35] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. *地理学报*, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [36] 郑伟, 石洪华, 陈尚, 张朝晖, 丁德文. 从福利经济学的角度看生态系统服务功能. *生态经济*, 2006, (6): 78-81.
- [37] 余坤勇, 刘健, 许章华, 缪丽娟. 闽江流域生态服务功能的遥感监测研究. *西南大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(11): 72-80.
- [38] 邓雨薇. 基于土地利用变化的精河流域生态系统服务价值研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [39] Soto J R, Escobedo F J, Khachatryan H, Adams D C. Consumer demand for urban forest ecosystem services and disservices: examining trade-offs using choice experiments and best-worst scaling. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 31-39.
- [40] 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.
- [41] 李琳, 林慧龙, 高雅. 三江源草原生态系统服务价值的能值评价. *草业学报*, 2016, 25(6): 34-41.
- [42] 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.
- [43] Grêt-Regamey A, Bebi P, Bishop I D, Schmid W A. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. *Journal of Environmental Management*, 2008, 89(3): 197-208.
- [44] Gascoigne W R, Hoag D, Koontz L, Tangen B A, Shaffer T L, Gleason R A. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA. *Ecological Economics*, 2011, 70(10): 1715-1725.
- [45] 欧维新, 王宏宇, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. *生态学报*, 2018, 38(17): 6337-6347.