

DOI: 10.5846/stxb201706281169

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研究.生态学报,2018,38(13): - .

Liu H, Wu J, Chen X L. Study on spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Danjiangkou water source area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究

刘 海^{1,2,3}, 武 靖¹, 陈晓玲^{4,5,*}

1 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062

2 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

3 江西省基础地理信息中心, 南昌 330209

4 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

5 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

摘要:研究区域多种生态系统服务之间的权衡协同关系特征,对不同生态系统服务、不同区域之间的协调发展,实现利益相关方效益最大化,达到区域发展与生态保护“双赢”具有重要意义。针对目前权衡协同定性分析、长时间动态变化研究不足的现状,以丹江口水源区为例,在采用“当量因子法”求得研究区生态系统服务价值的基础上,使用长时间整体分析占优的相关性分析方法和短时期动态变化分析占优的生态系统服务权衡协同度(ESTD)模型对研究区 1990—2015 年 10 种生态系统服务的权衡协同关系展开研究。结果表明:1990—1995 年,丹江口水源区生态系统服务价值呈负增长,之后则呈不断上涨的时序变化趋势,增幅最大的生态系统服务为水资源供给。生态服务价值最高的用地类型为林地,其次为草地和水域。空间上,生态系统服务价值呈东南高西北低特征。在丹江口水源区生态系统服务之间相互关系中,协同关系占 64%,是丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系,权衡关系较少,且大多存在于供给服务与调节服务、文化服务、支持服务之间。丹江口大坝加高后,即 2005 年之后,水源区内生态系统服务之间的权衡协同方向有所改变,改变明显的生态服务有净化环境、水文调节和水资源供给。这 3 种生态系统服务与生态系统服务之间的权衡关系增多,除这 3 种生态系统服务外,其余几种单项生态系统服务与生态系统服务之间的权衡关系减少。

关键词:丹江口水源区;生态系统服务价值;时空变化;权衡协同

Study on spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Danjiangkou water source area

LIU Hai^{1,2,3}, WU Jing¹, CHEN Xiaoling^{4,5,*}

1 Hubei university, Faculty of resources and environment Science, Wuhan 430062, China

2 Wuhan University, School of remote Sensing and information, Wuhan 430062, China

3 Jiangxi Provincial Geomatics Center, Jiangxi, Nanchang 330209, China

4 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, 99 Ziyang Road, Nanchang 330022, China

Abstract: Ecosystem management that attempts to maximize the production of one ecosystem service may result in

基金项目:江西省重大生态安全问题监控协同创新中心专项项目(JXS-EW-08); 2015 测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201512026); 湖北省青年科技晨光计划(HBCG); 国家自然科学基金项目(41601298)。

收稿日期:2017-06-28; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoling_chen@whu.edu.cn

substantial declines in the provision of other ecosystem services. For this reason, understanding the trade-offs and synergies of ecosystem services is of considerable significance to balance the characteristics of multiple ecosystem services and maximize the benefits of ecosystem services. The current situation is that there is insufficient researches on qualitative analysis and long time series of dynamic change among the trade-offs and synergies relationship. In addition, the selection of ecosystem services are inadequate. The Danjiangkou water source area is an important area of the South-to-North Water Diversion Project, and clarifying the temporal and spatial variation characteristics and relationships among ecosystem services can provide reference guidance for the smooth progress of the water transfer project in the middle route of the South to North Water Transfer project. At present, analysis of the relationships among ecosystem services in the Danjiangkou water source area is still insufficient. Given this situation, we studied the ecosystem service relationships of a long time series in the Danjiangkou water source area using different methods. First, we used the equivalent factor method to estimate the ecosystem service value. We then discuss the spatial-temporal difference and relationship of ecosystem services in six periods by correlation analysis and using an ecosystem services trade-off degree (ESTD) model. Correlation analysis has the advantage over long time series analysis. The ESTD model has the advantage of dynamic change analysis for short time periods. The results showed that during the period of 1990 to 1995, the value of ecosystem services in the Danjiangkou water source area showed a negative growth. However, the value of ecosystem services significantly improved from 1995 to 2015. The largest increase in ecosystem services occurred in water supply, and forest land provided the highest value of ecosystem services. Ecosystem service value increased from northeast to southwest. Correlation analysis showed that synergy is the dominate relationship among ecosystem services, and that there are few trade-offs in the Danjiangkou water source area. Since the Danjiangkou dam was heightened (after 2005), the relationship among ecosystem services in the water source area have changed. The trade-off relationships in the water source area increased among water supply, hydrological adjusting, and environment depuration, and trade-offs were reduced in other ecosystem services. Human disturbance is the most important factor that results in ecosystem service change.

Key Words: Danjiangkou water source area; ecosystem service value; spatial-temporal change; trade-off synergy

生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获取的所有利益,其中包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四个方面^[1-2]。该概念由 Wilson 于 1970 年首次提出,之后 Daily, Costanza 于 1997 年对生态系统服务进行了更深层次的研究^[1-3]。生态系统服务作为生态系统评估的核心领域,成为生态学的研究热点^[4]。2005 年,随着千年生态系统评估工作完成^[5],对生态系统服务研究从单纯的静态价值评估向着更加重视生态系统服务对人类福祉的影响方向发展^[6]。随着城市化加剧,人类所需求的生态系统服务的数量和种类越来越多^[7-9],人类对自然资源的利用已经超过了生态系统本身的提供限度,造成对某一服务功能的需求是以牺牲其他服务功能为代价,不同生态系统服务之间相互影响,导致很难甚至不可能同时达到利益最大化^[10]。为了明晰区域多种生态系统服务之间的相互关联特征,兼顾多种生态系统服务不同生态系统服务之间、不同区域之间的协调发展,实现利益相关方效益最大化,优化生态系统服务管理政策^[11],达到区域发展与生态保护“双赢”的目的^[12],有必要对生态系统服务进行集成研究^[13]。

“权衡”指某类型生态系统服务的供给由于其它类型生态系统服务使用的增加而减少的情形,“协同”指两种或多种生态系统服务同时增强或减少的情形^[14]。各类生态系统服务之间的相互作用,在不同尺度(时间与空间)的利益需求不同,几乎所有生态系统服务的决策都涉及到利益权衡^[15],因此权衡协同关系在全球范围内的生态系统服务之间普遍存在,但又表现出明显的地域差异性与动态变化性^[16-17]。目前,主要采用地理学和生态学相关理论对生态系统服务权衡与协同进行定性分析。对生态系统服务效益量化的研究较少^[18-19]。囿于数据获取、计算模型、指标构建等因素,选取的生态系统服务类型有限,对生态系统服务总体效益和单一服务效益之间动态关系的量化和评估研究不足^[12]。

南水北调中线工程是我国重要的跨流域调水工程,旨在解决我国华北地区的缺水困境,缓解北方城市的用水冲突,实现水资源的合理布局和分配^[20]。丹江口水源区作为中线工程的重要组成,明晰流域生态系统服务价值变化情况以及生态系统服务之间权衡与协同关系变化特征,对分析中线调水工程对流域生态环境的影响,智慧调水以及生态补偿具有重要意义。目前对于水源区的生态系统服务价值以定性研究较多,且仅关注某一种生态系统类型的单一生态服务价值^[21-22]。近年来,有较少学者以定量分析视角对水源区内的生态系统服务价值进行研究,但选取的生态系统服务有限,且未考虑单位面积生态服务价值当量的时空差异^[23-24]。对于水源区的生态系统服务之间的权衡协同关系,研究也较少^[25]。

因此,本文以丹江口水源区为研究区,采用 Costanza 等提出的生态系统服务价值估算方法,与基于地理模型的计算方法相比,该方法具有数据易于计算,标准化的优点,可以对多种生态服务价值进行计算。考虑到生态系统服务在时间尺度上的动态变化性和空间上的异质性,本文在借鉴 Costanza 和谢高地团队的研究结果基础上,对丹江口水源区的当量因子进行区域修正和功能系数修正,对研究区 1990—2015 年(1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年)6 个时期研究区 10 种生态系统服务价值及其时空变化特征进行估算分析。然后,基于以长时间整体分析占优的相关性分析方法和短时期动态变化分析占优的生态系统服务权衡协同度(Ecosystem Services Trade-off Degree, ESTD)模型,分析了不同时期水源区内各类型生态系统服务之间的权衡与协同关系。研究定量分析了总体效益与单一服务效益之间的关系,更清晰的展示了单一生态系统服务在整体效益中的作用,有利于决策者判断流域各生态服务起主导作用的服务类型,为流域生态系统服务的可持续增长提供方法支持;此外,研究以大坝加高的时间点为节点,分析了水源区内不同时期的各生态系统服务之间的权衡与协同关系,清晰的分析调水工程对水源区内生态系统服务的影响,为流域更科学的调水及生态补偿提供参考。

1 研究区概况和数据来源

汉江是长江中游最大的支流,发源于秦巴山地的宁强县,在武汉汇入长江。其干流全长 1577 km,流域面积约为 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[26-27]。其中丹江口以上为汉江上游,流域主要范围跨越陕西、湖北、河南,流域面积 9.52 万 km^2 ^[27](图 1)。研究区域位于秦岭山脉和大巴山脉之间,西部为中低山区,东部以平原丘陵为主。流域位于亚热带季风区,年均气温 12—16℃,年均降雨量约 700—1800 mm,主要地带性植被是落叶、常绿阔叶与针叶混交林^[25]。流域水资源丰富,是南水北调中线水源区,2005 年大坝加高工程之后,丹江口水库库容增加,正常蓄水位由 157 m 提高到 170 m,正常蓄水位库容由 174 亿 m^3 增加到 290 亿 m^3 ,汉江水资源将得到更好的调节^[27]。

本研究利用的主要数据包括:1990—2015 年 6 个时期土地利用矢量数据,由中国国家地球系统科学数据共享平台(www.geodata.cn)提供;1990—2015 年 6 个时期全国稻谷、小麦和玉米的播种面积以及单位面积收益和支出,数据来源于《中国统计年鉴》^[28]和《全国农产品成本收益资料汇编》^[29];全国、湖北省、陕西省、河南省 1990—2015 年 6 个时期的农田粮食单位面积产量,数据来源于中国及各省统计年鉴;1990—2015 年丹江口水源区 NPP 数据,来源于国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>)。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值估算

2.1.1 标准单位当量因子的价值量核算

标准单位当量因子(以下简称当量因子)是指 1 hm^2 全国平均产量的农田每年自然粮食产出的经济价值^[30],以此当量为参照并结合专家知识可以确定其他生态系统服务的当量因子的价值量,可以表征和量化不同类型生态系统对生态服务功能的潜在贡献能力。本研究参考谢高地^[31]等的处理方法,将单位面积农田生态系统粮食生产经济价值的 1/7 作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量,计算公式如式 1。

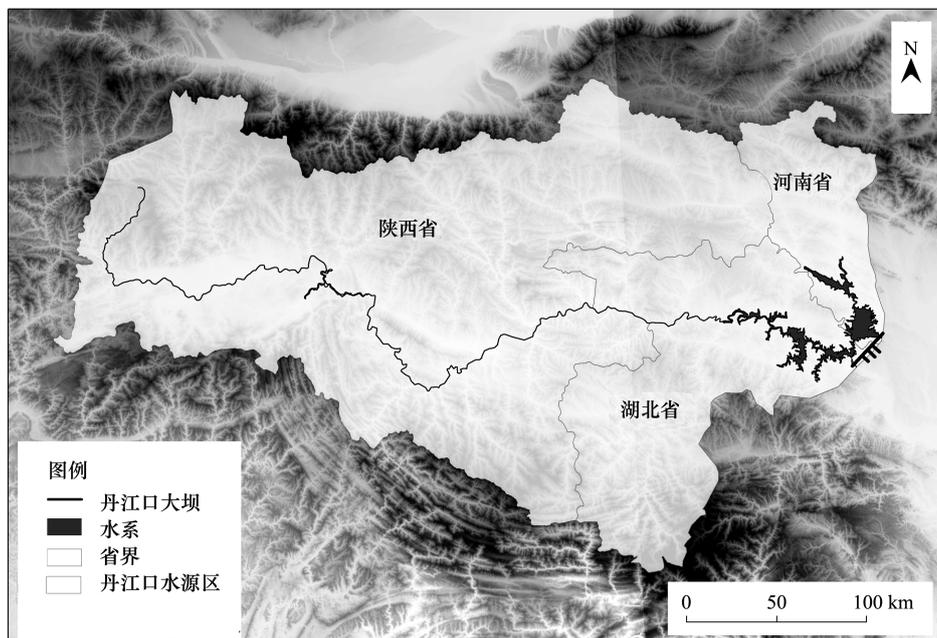


图1 丹江口水源区

Fig.1 Danjiangkou water source area

$$D_j = 1/7 \left(\sum_{i=1}^n s_{ij} w_{ij} - p_{ij} \right) \quad (1)$$

式中, D 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量 (元/hm²), S_{ij} 为研究区第 j 年第 i 类农作物 (hm²); w_{ij} 为第 j 年第 i 类农作物单位面积总收益; p_{ij} 为第 j 年第 i 类农作物总支出。

2.1.2 单位面积生态系统服务价值的基础当量表

单位面积生态系统服务价值的基础当量是评估区域生态系统的各项生态系统服务价值的基础,它是指不同类型生态系统单位面积上各类服务功能年均价值当量^[31]。Costanza 方法中,土地利用类型的单位面积生态系统服务价值主要反映的是欧美发达国家的经济水平,在中国应用中存在偏差^[32],为此,中国科学院地理科学与资源研究所谢高地团队针对上述问题,根据中国生态系统和社会经济发展状况,对中国 700 位具有生态学背景的专业人员进行问卷调查的基础上进行改进,制定了中国生态系统服务价值的基础当量表^[32]。

由于本研究所使用的 LUC 土地利用数据分级标准和谢高地团队的生态系统分级标准存在差异,故需要按研究需要将土地利用数据进行重分类。

谢高地的生态系统一级分类包含的 6 种土地利用类型中,4 种土地利用类型与中国科学院提供的土地利用类型相一致,存在差异的土地利用类型包括建设用地与未利用土地,因谢高地的生态系统分类中只包含有荒漠和湿地,故需要将这两类土地利用数据依据谢高地的生态系统分级标准进行重分类。鉴于丹江口水源区的未利用地主要为沙地,沼泽地,裸土地,裸岩石质地,其中沙地的生态系统服务价值与荒漠比较一致;沼泽地的生态系统服务价值与湿地较为相近;裸土地,裸岩石质地以及城乡工矿居民用地的生态系统服务价值与裸地较为相近,故这里将中国科学院土地利用类型中沙地,裸土地,裸岩石质地与建设用地的生态系统服务价值当量归并为谢高地的生态系统分类中的荒漠,将沼泽地重分类为湿地。

除一级分类外,二者二级类型分级标准也存在差异,主要存在于林地、草地中。LUC 土地利用数据分级标准中,将林地分为有林地、疏林地、其它林地和灌木林,而谢高地团队将林地分为针叶、针阔混交林、阔叶林和灌木林,考虑到丹江口水源区属亚热带季风区,故将林地中的有林地和其他林地归为针阔混交林;根据林学野外调查,将疏林地和灌木林归为灌木林;LUC 土地利用数据分级标准中,将草地分为高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地,而谢高地团队将草地草原、灌草丛和草甸,目前对生态系统服务的研究中并未明确

高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地 3 种草地类型各自的当量,考虑到后期计算,此处将这 3 种类型草地统一归为灌草丛。重分类后,得到汉江流域单位面积生态系统服务价值基础当量表。

表 1 单位面积生态系统服务价值基础当量表

Table 1 Ecosystem service equivalent value per unit area

生态系统分类 Classification of ecosystem service		供给服务 Supply service			调节服务 Regulation service			支持服务 Composite service		文化服务 Culture service	
一级 分类	二级 分类	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	生物多 样性	美学 景观
农田 Farm land	旱地 水田	0.85 1.36	0.4 0.09	0.02 -2.63	0.67 1.11	0.36 0.57	0.1 0.17	0.27 2.72	1.03 0.01	0.13 0.21	0.06 0.09
森林 Forest land	针阔混 交林	0.31	0.71	0.37	2.35	7.03	1.99	3.51	2.86	2.6	1.14
草地 Grass land	灌木 灌草丛	0.19 0.38	0.43 0.56	0.22 0.31	1.41 1.97	4.23 5.21	1.28 1.72	3.35 3.82	1.72 2.4	1.57 2.18	0.69 0.96
湿地 Wet land	湿地	0.51	0.5	2.59	1.9	3.6	3.6	24.23	2.31	7.87	4.73
荒漠 Desert	荒漠 裸地	0.01 0	0.03 0	0.02 0	0.11 0.02	0.1 0	0.31 0.1	0.21 0.03	0.13 0.02	0.12 0.02	0.05 0.01
水域 Water	水系	0.8	0.23	8.29	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	2.55	1.89

2.1.3 当量因子的修正

2.1.3.1 区域修正

由于表 1 是谢高地团队基于 2010 年全国的相关数据计算而得,考虑到生态系统服务价值的变化具有时间和空间效应,故本研究以 2010 年为基准,对丹江口水源区 1990—2015 年当量因子进行区域修正,修正系数为丹江口水源区相应年份农田粮食单位面积产量与 2010 年全国农田粮食单位面积产量的比值。修正结果如表 2:

表 2 丹江口水源区不同年份不同省份当量因子(元/hm²)

Table 2 Different provinces equivalent value in different years of Danjiangkou water source area (yuan/hm²)

当量因子 Equivalent Factor	全国 China	丹江口水源区 Danjiangkou water source area	当量因子 Equivalent Factor	全国 China	丹江口水源区 Danjiangkou water source area
1990	356.74	315.79	2005	449.10	384.45
1995	383.24	326.06	2010	481.19	409.99
2000	404.80	367.10	2015	530.46	485.90

2.1.3.2 功能性系数修正

微观空间尺度上,生态系统本身的多样性和环境条件的多样性决定了生态系统服务的类型和强度具有空间差异性。一般来说,生态系统的生态服务功能大小与该生态系统的生物量有密切关系^[30]。不同的景观类型,其生物量和区域水热状况也不同,生物量越大,其生态功能越强。但由于生物量的计算模型众多,且不同生态系统的计算方法不同^[33],因此难以对丹江口水源区的生物量进行准确计算。鉴于此,本文选取与生物量相近的植被净初级生产力(NPP)来对研究区当量因子进行功能性系数修正。由于 NPP 计算涉及数据众多,2000 年以前的相关数据获取困难,为了保证数据的一致性,本文使用 NPP 模拟数据进行修正(该数据是在 CRU 气象中心发布的全球历史时期气象数据的驱动下,利用 IBIS 模型模拟获得),方法如下:

将研究区内中某一像元的 NPP 值(NPP_{ij})与该像元所属类型的生态系统的 NPP 平均值相比,将比值作为功能性系数(p_i)对当量因子进行逐像元的动态调整。

$$p_i = \text{NPP}_i / \text{NPP}_{ij\text{mean}} (i = 1990, 1995, \dots, 2015) (j = 1, 2, \dots) \quad (2)$$

式中: p_i 代表第 i 年的功能性调整系数; NPP_i 代表第 i 年某一像元的 NPP 值; $\text{NPP}_{ij\text{mean}}$ 代表第 i 年第 j 类生态系统的 NPP 的平均值。

2.1.4 生态系统服务价值估算模型

以表 2 中丹江口水源区不同年份当量因子, 结合表 1 单位面积生态系统服务价值基础当量表和 NPP 模拟数据计算得到丹江口水源区不同年份生态系统服务单位面积价值当量。在此基础上, 以不同年份汉江流域土地利用数据为主要数据源, 基于生态系统服务价值估算模型对汉江流域生态系统服务价值进行估算。估算模型如公式 2:

$$\text{WSV} = \sum_{i=1}^n (S_i \times \text{VC}_i \times a \times p_i) \quad (3)$$

式中, ESV 为生态系统服务价值总量, S_i 为研究区第 i 类土地利用类型面积 (hm^2); VC_i 为第 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 为土地利用类型; a 为修订系数, p_i 为第 i 年的功能性调整系数。

2.2 权衡与协同关系研究方法

2.2.1 相关分析

相关分析可以定量描述两个变量之间的线性相关程度, 明确两个变量之间的相关方向^[34]。相关关系有强弱方向之分, 数值越大相关性越强, 数值越小相关性越弱; 数值为正表明一个变量增加, 另一个变量也增加, 称为正相关, 数值为负, 表明一个变量增加, 另一个变量减少, 称为负相关。计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: R_{xy} 为相关系数; n 为样本数; x_i, y_i 分别是 x, y 的第 i 个值; \bar{x}, \bar{y} 分别是变量 x, y 的平均值。

2.2.2 生态系统服务权衡协同度

生态系统服务权衡协同度 (Ecosystem Services Trade-off Degree) 是建立在数据线性拟合的基础之上, 反映各个生态系统服务间相互作用的方向和程度的方法^[13], 目的是对研究区生态系统服务变化量的相互作用进行整体的评价。下文简称为 ESTD, 计算公式如下:

$$\text{ESTD}_{ij} = \frac{\text{ESC}_{ib} - \text{ESC}_{ia}}{\text{ESC}_{jb} - \text{ESC}_{ja}} \quad (5)$$

式中: ESTD_{ij} 表示第 i, j 种生态系统服务权衡协同度; ESC_{ib} 为 b 时刻第 i 种生态系统服务的变化量; ESC_{ia} 为 a 时刻第 i 种生态系统服务的变化量; $\text{ESC}_{jb}, \text{ESC}_{ja}$ 与此相同。ESTD 代表某两种生态系统服务变化量相互作用的程度和方向, ESTD 为负值时, 表示第 i 与 j 种生态系统服务为权衡关系; ESTD 为正值时, 表示两者之间为协同关系; ESTD 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。

3 结果

3.1 生态系统服务价值时空变化

3.1.1 生态系统服务价值时间变化

利用公式 3 求得丹江口水源区 1990—2015 年各项生态系统服务价值如下 (表 3): 1990—2015 年丹江口水源区生态服务价值从 404.03 亿元增加至 571.15 亿元, 共增长了 211.86 亿元, 增幅为 58.97%, 年平均增长率为 2.36%。其中 1990—1995 年, 丹江口水源区生态服务价值为负增长, 与 1990 年相比减少了 44.74 亿元, 降幅为 11.07%。其余年份水源区生态服务价值总体呈增长趋势, 其中增长幅度最大的时间段为 2005—2010 年, 增幅为 24.86%; 增幅最小的时间段为 2000—2005 年, 仅为 5.22%。

表 3 1990—2015 丹江口水源区生态系统服务价值(元/hm²)Table 3 Ecosystem services value of Danjiangkou water source area in 1990—2015(yuan/hm²)

年份 Year	供给服务 Supply service			支持服务 Composite service			调节服务 Regulation service			文化服务 Culture service	计 Total	前一时间段 与后时间段的 变化率/% Change rate
	食物 生产	原料 生产	水资源 供给	土壤 保持	生物 多样性	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	美学 景观		
1990	11.57	12.06	1.37	47.13	41.32	40.62	104.84	33.02	93.77	18.33	404.03	-
1995	10.18	10.78	0.77	42.13	36.93	36.26	93.96	29.48	82.41	16.39	359.29	-11.07
2000	11.47	12.09	1.31	47.22	41.38	40.59	104.92	32.84	89.58	20.32	401.71	11.81
2005	12.06	12.71	1.44	49.61	43.58	42.69	110.46	34.68	96.11	19.35	422.68	5.22
2010	15.04	15.86	1.89	61.91	54.34	53.24	137.8	43.28	120.26	24.13	527.74	24.86
2015	16.31	17.13	1.96	66.95	58.76	57.65	148.97	46.82	130.5	26.09	571.15	8.23

从生态系统服务类型来看,气候调节、水文调节、土壤保持和生物多样性构成了丹江口水源区生态系统服务价值的主体。水资源供给价值最低,但增长幅度最大,25年间增长了0.58亿元,增幅为43%。增长幅度最小的生态服务价值为水文调节,25年间增长了36.72亿元,增幅为39%。从丹江口水源区各类用地提供的生态系统服务价值来看,林地的生态系统服务价值始终最高,其次为草地、水域、农田,这4类用地提供了水源区95%以上的生态服务。从各类用地生态系统服务价值占总生态服务价值的比例变化情况来看,农田占总生态服务价值的比例呈波动变化,但总体呈增加趋势,由3.26%增加至4.17%;草地占总生态服务价值的比例与农田相同,总体呈增加趋势,由29.04%增加至30.06%;林地占总生态服务价值的比例则呈波动减小的趋势,由58.73%减少至56.94%;水系则相反,占总生态服务价值的比例呈波动增加的趋势,由8.62%增加至9.05%;建设用地,荒漠,裸地占总生态服务价值的比例呈增加趋势,但所占比例极小,均小于0.1%。

3.1.2 生态系统服务价值空间变化

在GIS软件中,基于栅格统计了丹江口水源区1990、1995、2000、2005、2010和2015年研究区域的生态系统服务价值,根据价值高低分为六类,得到生态系统服务价值分布图(图2)。由图2可知,丹江口水源区生态系统服务价值呈现明显的西南高,东北低的特征。生态系统价值高值的区域分布在南部和东部部分地区,最高值位于丹江口水库周围。生态系统价值低值的区域与农田分布较为一致,主要分布在西部的水田以及东部的旱地区域。生态系统价值中值分布范围较广,主要分布在水源区的中部和西部部分地区。1990—1995年,水源区生态服务价值减少,生态服务低值区域范围由中东部向西扩大,南部的高值区域范围减小。1995—2015年生态服务价值呈增长趋势,西部和南部区域的生态服务价值增大,东部的低值区域也有所减少。

计算1990—2015年各网格的生态系统服务价值动态变化度后得到水源区生态系统服务价值动态变化度空间分布图(图3)。可以看出,动态变化度为负值的区域零散分布在在水源区内,与土地利用变化区域的分布范围比较吻合;动态变化度低值和中值区域主要分布于水源区的西部部分地区和东部地区,且这些区域大都为农田;动态变化度高值区域面积最广,中西部较为集中,与水源区内林草地的分布较为一致;动态变化度极高值区域主要分布于水源区北部。

3.2 丹江口水源区生态系统服务之间的关系

3.2.1 生态系统服务关联关系

在对丹江口水源区生态系统服务价值进行估算之后,依据相关分析,得到10种生态系统服务之间的相关性(表4)。相关性结果为正值时,表明两种生态系统服务具有协同关系,即两种生态系统服务在同一时间段具有同样的上升或降低趋势,一种服务的增加会对另一种服务产生一定的促进和增幅作用,结果为负值时,表明两种生态系统服务具有权衡关系,即一种生态系统服务的增加引起了另一种生态服务的减少。

丹江口水源区10种生态系统服务之间组成100组值,其中36组值为负,64组为正,其中18组在0.01水平上显著正相关,8组在0.05水平上显著正相关。

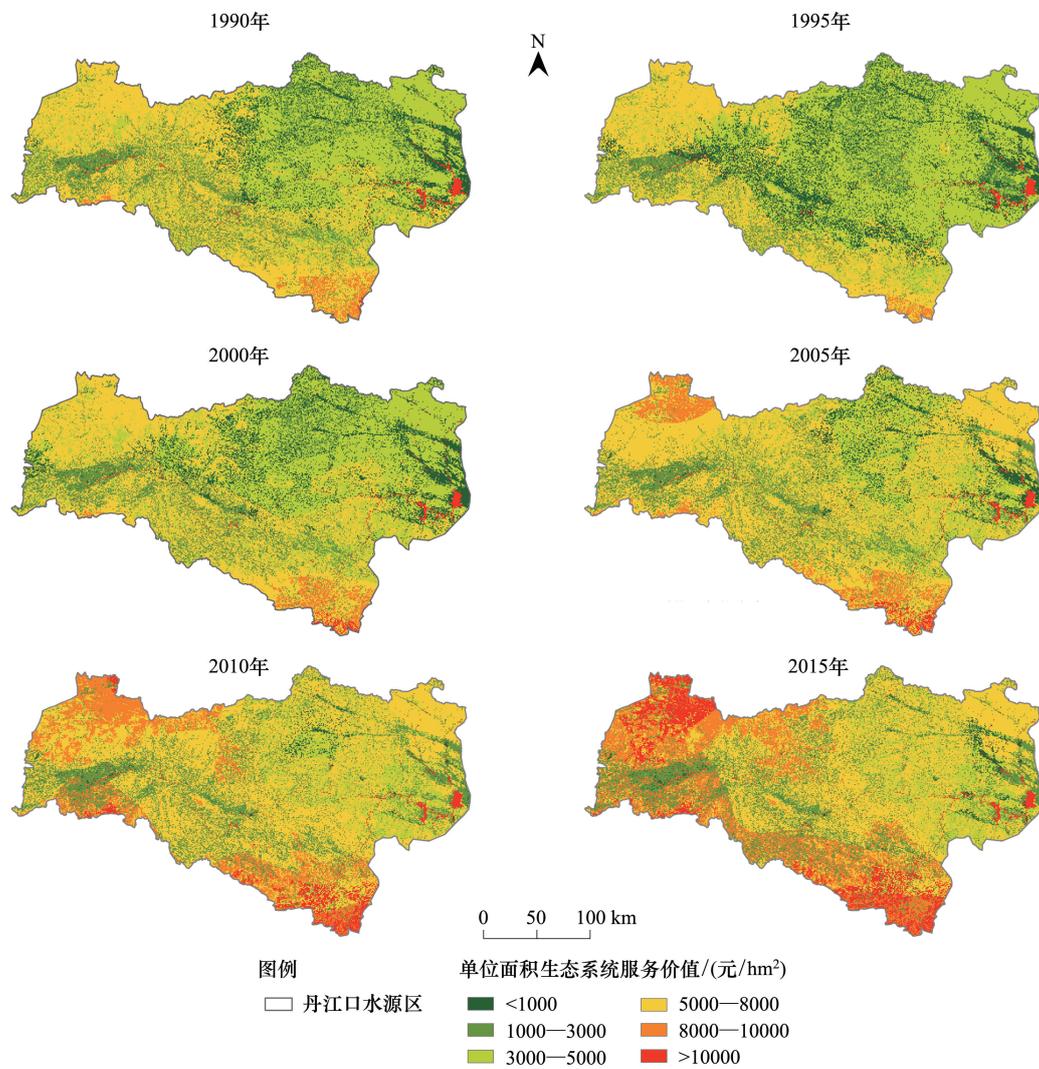
图2 历年生态系统服务价值分布图(元/hm²)Fig.2 Distribution of Ecosystem services value in 1990—2015(Yuan/hm²)

表4 丹江口水源区生态系统服务价值间关系

Table 4 Interaction of ecosystem services in Danjiangkou water source area

相关 Correlation	供给服务 Supply service			调节服务 Regulation service				支持服务 Composite service		文化服务 Culture service
	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	生物多 样性	美学 景观
食物生产 Food production	1	-0.052	-0.624	-0.179	-0.529	-0.748	-0.493	-0.359	-0.632	-0.705
原料生产 Raw material production	-0.052	1	-0.593	0.965 **	0.851 *	0.156	-0.56	0.931 **	0.666	0.458
水资源供给 Water supply	-0.624	-0.59	1	-0.377	-0.088	0.702	0.976 **	-0.254	0.209	0.446
气体调节 Gas regulation	-0.179	0.965 **	-0.377	1	0.930 **	0.395	-0.326	0.982 **	0.821 *	0.659
气候调节 Climate regulation	-0.529	0.851 *	-0.088	0.930 **	1	0.625	-0.092	0.982 **	0.947 **	0.836 *

续表

相关 Correlation	供给服务 Supply service			调节服务 Regulation service			支持服务 Composite service		文化服务 Culture service	
	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	生物多 样性	美学 景观
净化环境 Environment depuration	-0.748	0.156	0.702	0.395	0.625	1	0.72	-0.603	0.838 *	0.949 **
水文调节 Hydrological adjusting	-0.493	-0.56	0.976 **	-0.326	-0.092	0.72	1	-0.234	0.226	0.467
土壤保持 Soil conservation	-0.359	0.931 **	-0.254	0.982 **	0.982 **	0.502	-0.234	1	0.892 *	0.748
生物多样性 Biodiversity	-0.632	0.666	-0.314	0.821 *	0.947 **	0.838 *	0.226	0.892 *	1	0.967 **
美学景观 Aesthetic landscape	-0.705	0.458	0.446	0.659	0.836 *	0.949 **	0.467	0.748	0.967 **	1

** 表示两种生态系统服务在 0.01 水平上显著相关; * 表示两种生态系统服务在 0.05 水平上显著相关

在丹江口水源区生态系统服务之间相互关系中,协同关系占 64%,表明协同关系是丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系。这些协同关系主要存在于调节服务、支持服务与其他类型的生态系统服务的关系之中。

丹江口水源区存在的权衡关系中,83.46%与供给服务有关。在供给服务中,三种不同类型的供给服务彼此之间均呈此消彼长的权衡关系,其中食物生产与调节服务、支持服务、文化服务均呈权衡关系;原料生产与食物生产、水文调节为权衡关系;水资源供给与食物生产、原料生产、气体调节、气候调节以及土壤保持为权衡关系。

调节服务中,气候调节、气体调节、净化环境三者之间相互为正相关,其中气候调节与气体调节的相关性较高,这 3 种调节服务之间为彼此增益的协同关系,水文调节与气体调节、气候调节则呈不显著权衡关系,与净化环境为协同关系。这 4 种调节服务均与支持服务、文化服务存在正相关关系,呈协同增长的趋势。

支持服务中,土壤保持与生物多样性之间存在显著正相关关系,与调节服务、文化服务均为相互增益的协同关系,与供给服务中的食物生产为权衡关系,与原料生产和水资源供给为协同关系。

文化服务中的美学景观除与食物生产为权衡关系外,与其他服务均为相互增益的协同关系,其中,与调节服务中的气候调节、净化环境以及支持服务中的生物多样性存在较强的协同关系。

3.2.2 生态系统服务权衡协同度

生态系统服务之间的相关分析是从整个时间跨度方面分析生态系统服务之间的关系。为了进一步评估不同时间段生态系统服务之间相互作用的程度和方向,本研究引入生态系统服务权衡协同度(ESTD)模型对丹江口水源区生态系统服务间的关系进行量化评估,当 ESTD 为正值时,表明这两种生态系统服务变化方向相同。ESTD 为负值时,表明这两种生态系统服务变化方向相反。ESTD 绝对值表示两种生态系统服务之间的变化程度的大小。

除了计算 1990—2015 年的权衡协同度外,为了研究丹江口大坝加高后对丹江口水源区生态系统之间相互关系的影响,本文在对丹江口水源区生态系统服务价值估算的基础上,以丹江口大坝加高的时间点为间隔点,对丹江口水源区 1990—2005 年、2005—2015 年两个时间段的生态系统服务权衡度进行计算。结果如下

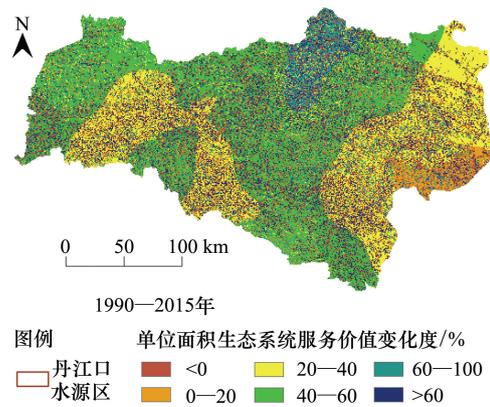


图 3 1990—2015 年生态系统服务价值动态变化度分布图
Fig.3 Distribution of dynamic variation of Ecosystem services value in 1990—2015

(图 4—图 6)。

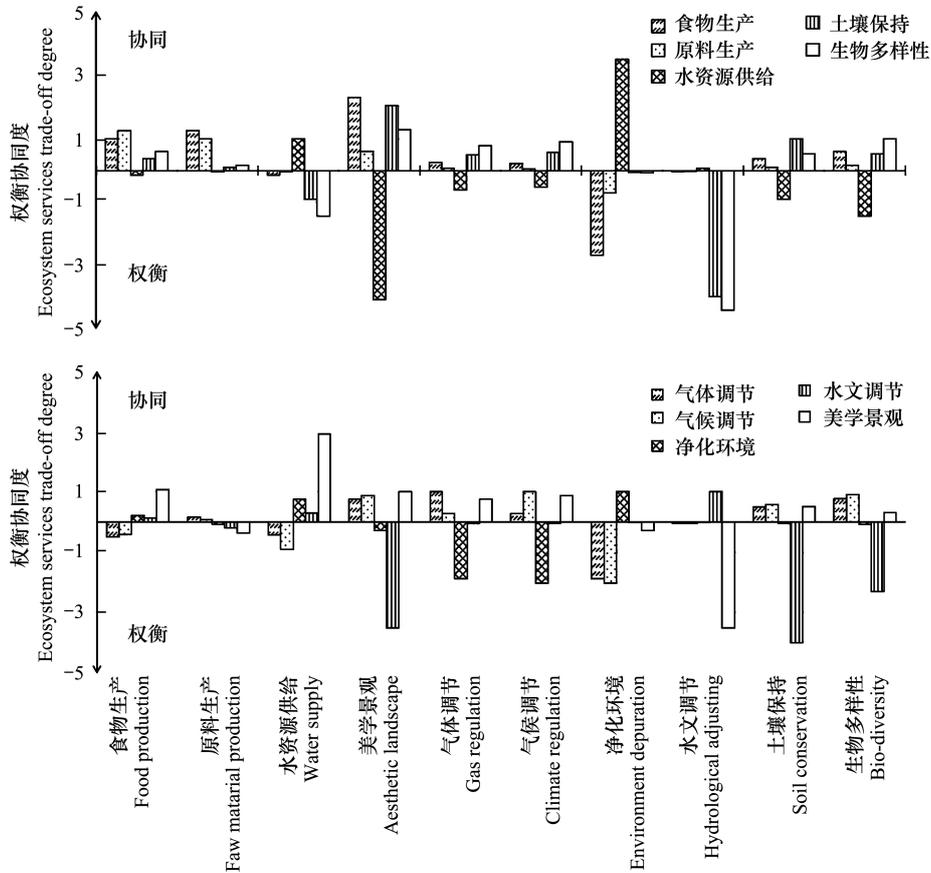


图 4 丹江口水源区 1990—2015 年各生态系统服务价值间关系

Fig.4 Interaction of ecosystem services in Danjiangkou water source area in 1990—2015

图 4 是丹江口水源区 1990—2015 年各生态系统服务价值间权衡协同关系图,各生态系统服务之间组成 100 组值,其中 44 组值为负,56 组为正,协同关系占 56%,表明协同关系是丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系。这些协同关系主要存在于文化服务与调节服务、支持服务与调节服务中。其中,水资源供给和净化环境的协同度最高,土壤保持和人文调节权衡度最高。

图 5 图 6 表明,丹江口大坝加高后,水源区内的生态系统服务变化量相互作用的程度和方向均有所改变。

1990—2005 年以前,水源区生态系统服务之间存在着权衡和协同关系比例大致相当,权衡关系有 52 组,协同关系 48 组。权衡关系多存在于供给服务与供给服务内,供给服务与气候调节、气体调节,供给服务与支持服务、净化环境、水文调节与支持服务,支持服务与文化服务之间,协同关系多存在于供给服务与文化服务,气候调节、气体调节与支持服务之间。其中,水文调节与生物多样性的权衡度最高,与美学景观的协同度最高;土壤保持与水文调节的权衡度也较高。

2005 年以后,水源区内生态系统服务之间的权衡协同关系有所改变。其中,食物生产、美学景观、气体调节和气候调节与其余几种生态系统服务的关系变化较大。水资源供给,净化环境和水文调节与生态系统服务之间的权衡关系增多,土壤保持、生物多样性、原料生产与食物生产与生态系统服务之间的协同关系增多。综合来看,水源区内生态系统服务之间的协同关系增大,由原来的 48 组增加至 54 组,权衡关系由原来的 52 组减少至 46 组,使得协同关系成为丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系。

从水源区内的生态系统服务变化量相互作用的程度来看,生态系统服务权衡协同度的极值增大,不同类型的生态系统服务权衡协同度变化情况不同。

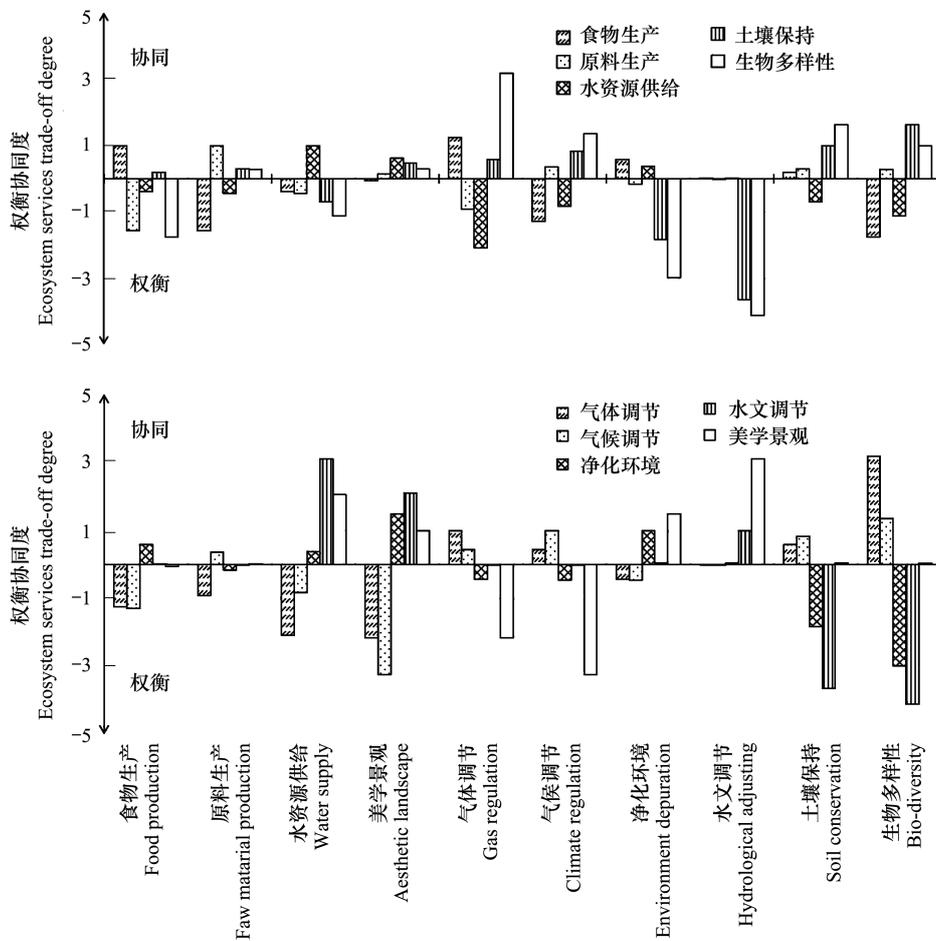


图5 丹江口水源区 1990—2005 年各生态系统服务价值间关系

Fig.5 Interaction of ecosystem services in Danjiangkou water source area in 1990—2005

供给服务中,原料生产与生态系统服务之间的协同有所增大;水资源供给与供给服务与文化服务的权衡极值增大。调节服务中,净化环境和水文调节与生态系统服务之间的协同度减小,与供给服务的权衡关系增大;气体调节和气候调节与生态系统服务之间的协同度增大,与供给服务之间的权衡度减小,与净化环境、水文调节的权衡度增大。支持服务中与调节服务的权衡度增大,与文化服务协同度增大,与支持服务协同度有所减小。

4 讨论

4.1 生态系统服务价值变化及其驱动因素

丹江口水源区 1990—1995 年丹江口水源区生态系统服务价值有所减少,其余年份水源区生态服务价值总体呈不断增加的时序变化趋势,增幅最大的生态系统服务类型为水资源供给,增幅最大的时间段为 2005—2010 年。1990—1995 年研究区经济发展,人口不断增加,流域人口剧增导致土地利用状况发生变化,日益增长的生态服务消费需求和获取方式使得生态系统不断退化,导致生态系统服务降低^[35]。而 1995 年以后,随着退耕还林和南水北调中线工程政策的实施,国家加强了研究区生态环境的治理,实施了“丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划”^[36],提高水土流失累计治理程度,大力发展绿色产业,引起水文调节,净化环境,水资源供给等相关生态服务价值快速提升,导致生态系统服务价值回升。随着丹江口大坝的加高,水源区内水域面积大幅增长,使得水资源供给成为增幅最大的生态系统服务类型。

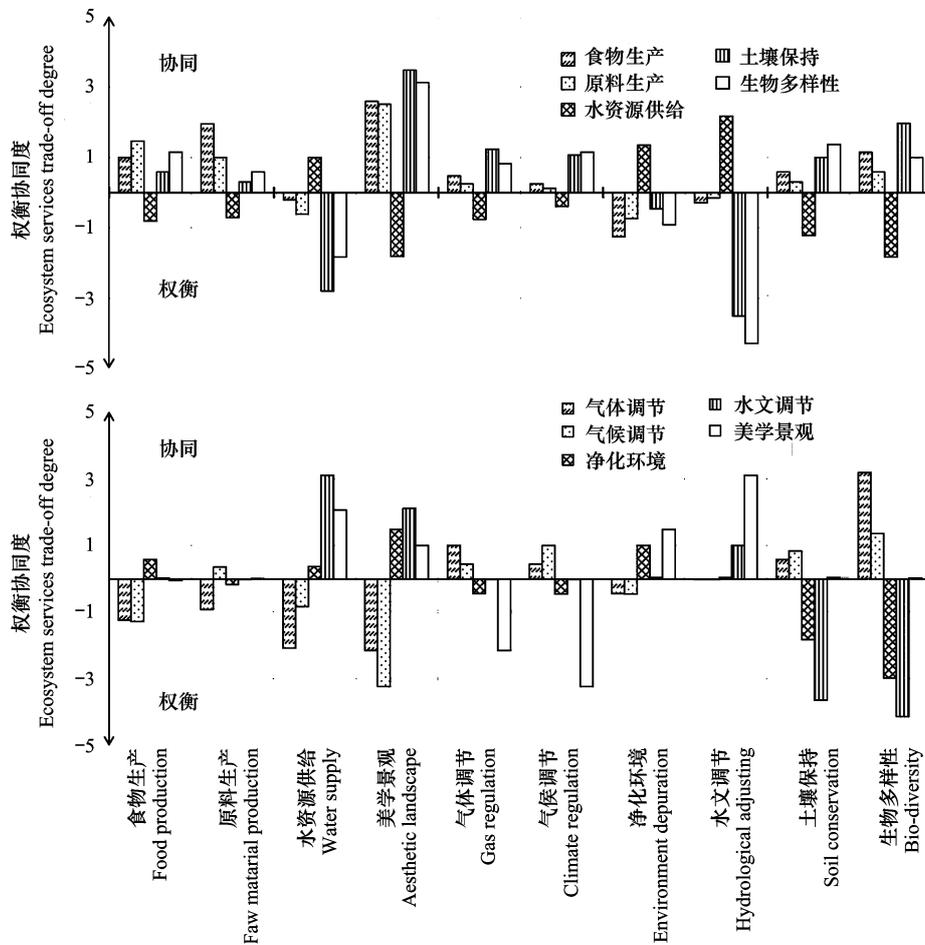


图 6 2005—2015 年丹江口水源区各生态系统服务价值间权衡协同关系

Fig.6 Interaction of ecosystem services in Danjiangkou water source area in 2005—2015

丹江口水源区生态系统服务价值在空间分布上呈西南高,东北低的特征,产生这种情况的原因主要与水源区内的土地利用的分布格局有关,水源区东部、北部农田分布广泛,人为因素对生态系统干扰较大,而西部林草地较多,生物量大,优良的生态资源造就了该区域相对较高的生态系统服务价值。1990—2015 年研究区生态系统服务价值动态变化度较高的区域集中分布在林草地区,动态变化度较低的区域分布情况与农田区较为吻合,动态变化度的区域差异与不同用地的空间分异有着极为密切的联系,随着研究区退耕还林政策的实施,植被 NPP 提高,相应的生物量也有所增大,导致林草地的生态系统服务价值变化明显。农田区由于人类不合理的用地方式,导致水土流失和地表裸露^[37],使该区域 NPP 较低,但由于当量因子逐年增长,综合导致农田区生态系统服务价值变化度较低。

综合来讲,研究区生态系统服务价值变化的原因有两种:一是用地类型的改变造成各自然生态系统服务种类变化;二是自然生态系统健康程度直接造成单位面积生态系统提供的服务功能价值的变化^[38]。此外,政策因素对生态系统服务价值变化的影响不可忽视,因此相关部门在制定区域发展政策时,要特别注重国土管理和生态环境之间协调发展^[39]。

4.2 生态系统服务权衡协同关系原因分析

丹江口水源区地貌类型多样,包括山地、平原、丘陵等,生态系统类型间相互影响相互制约,形成了独具区域特色的生态系统间的关联关系。本文使用两种方法对水源区的生态系统服务关系进行研究,综合来看,两种方法均表明,协同关系为水源区内的生态系统服务之间的主导关系,权衡关系较少,且多存在于水资源供给、水文调节与其他类型的生态系统服务之间。

由于计算方式不同,二者的计算结果也存在差异。相关性分析使用长时间内的多组数据来衡量整个时间跨度内变量间的相关关系,对长时间内生态系统服务权衡协同关系分析占优。而权衡协同度模型是通过分析相应两个年份的生态服务值的变化来研究权衡协同关系,对短时间内生态系统服务关系研究具有优势。因此,讨论部分主要对相关分析计算出的长时间内生态系统服务关系的结果进行分析,对权衡协同度模型计算出的短时间内生态系统服务关系的结果进行分析。

4.2.1 长时间内生态系统服务权衡协同关系原因分析

此前对生态系统服务权衡关系的研究表明^[40-42],供给服务与调节服务多呈权衡关系,本文引入多种类型服务,发现同一类型生态服务内部之间也存在权衡协同关系,且与调节服务的关系也存在差异。

水资源供给、食物生产与原料生产服务为两两权衡关系,与调节服务之间的权衡协同关系也各不相同。这是由于这3种服务中,起主要影响作用的用地类型不同。水资源供给的能力主要来源于水系,因此水资源供给能力较强的区域食物生产和原料生产的能力较低。但水系通过蒸发成为水蒸气,然后又以降水的形式降到周围地区,保持当地的湿度和降雨量,起到了调节气候的作用,自然降雨又会影响水资源的补给,促进植被的生长,进而涵养水源。因此水资源供给与调节性服务互相增益,彼此为协同关系^[43]。食物生产能力较强的耕地区域,尤其是水田,对灌溉需求较高。加之人类不合理的耕作方式导致水土流失,地表裸露,导致对生态系统的调节能力较低,因此与调节服务、水资源供给为此消彼长的权衡关系^[40]。林草地在原料生产中贡献突出,因此原料生产能力较强的林草地区域食物生产能力较弱,对水资源的供给能力较差,而对生态系统的调节能力较高。

调节服务与支持服务及文化服务为相互增益的协同关系。研究表明,林草地对于碳储存的增加、调节气候方面有着积极作用,这两者又会促进林地的生长和林内生物种类的增多,而树根有利于稳定坡度,减少土壤侵蚀量,进而起到水土保持的作用^[41-42]。调节能力较高的林草地区域植被覆盖度较高,而地表植被覆盖较高的区域降水截留的能力较强,会减少水分的流失,起到了保持土壤和促进区域生物多样化的作用^[36]。丰富的生物多样性以及较好的土壤条件也会促进林草地的生长,进而对生态系统的调节发挥积极影响。

4.2.2 短时间内生态系统服务权衡协同关系变化原因分析

利用 ESTD 模型对 2005 年前后丹江口水源区生态系统服务之间的研究发现,2005 年之后的时期,水源区内生态系统之间的协同关系增加,权衡关系减少。人为扰动因素是生态系统服务变化的最重要因素。2005 年丹江口大坝加高工程启动。大坝加高后,坝顶高程由 162 米加高至 176.6 m,正常蓄水位由 157 m 抬高至 170 m,相应库容由 174.5 亿 m^3 增加至 290.5 亿 m^3 ^[44]。大坝加高使水源区内水域面积快速增长,2005 年之前,水源区内水域面积变化较为稳定。2005 年之后,水域面积大幅增长,由 923 km^2 增加为 992 km^2 ,到 2015 年,水域面积已达到历年最高。此外,国家对水源区水环境的保护和污染防治工作的开展和进步,也促进了水源区内水文调节,净化环境,水资源供给等生态系统服务价值快速增加。

但大坝的加高造成水源区部分地区河道下切,使引水条件改变、地下水位降低,对部分地区的灌溉引水带来了不利影响。此外,由于大坝改变了地表水和地下水的时空特征,对水源区土壤中的物质代谢造成影响,进而影响土壤的理化性质从而造成农田提供的粮食供给服务受到影响^[45]。大坝的加高还打断了水源区生态系统的连通性,阻隔了物种的交流,对水源区生物多样性也带来不利影响^[46]。与此同时水源区内经济快速发展,面临着人口增长与城市扩张的双重压力。水域、建筑用地面积的增长自然就导致农田、林地面积下降,与此相关的生态系统服务也受到影响,造成生态系统服务之间的权衡协同关系发生变化。

4.2.3 两种权衡协同方法的联系与区别

本文使用相关分析和权衡协同度模两种方法对丹江口水源区的生态系统服务权衡协同关系进行研究。结果表明,两种方法的均能清楚的展示各项生态系统服务之间的关系,研究结果较为一致,均表明协同关系是丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系,且权衡关系多出现在水资源供给、水文调节以及食物生产同其他生态系统服务之间。但具体相关数值的大小及个别生态系统服务之间的权衡协同关系存在差异。前者的

相关性系数介于-1—1 之间,而后者介于-25—20 之间。产生这种差异的原因在于二者计算方法及计算是用及的数据都不同,前者在计算某两种生态系统服务之间的关系时,除考虑该两种生态系统服务相应年份的值外,还要考虑所有中间年份的值,以此进行标准化,因此值介于-1—1 之间;而后者只考虑该两种生态系统服务相应年份的值,故相关数值差异较大。

4.3 南水北调大坝加高工程对水源区的影响及建议

为了获取某些特定生态系统服务,人类将大坝建设融入到水源区生态系统之中,大坝加高之后,水源区内水域面积增加,对水资源的供给、水文调节等方面的积极作用明显,但在获取和改变这些生态系统服务的同时,不可避免地使区域的粮食生产、原料生产、生物多样性等生态服务价值受到影响,进而影响区域生态系统服务的协同与权衡。从国家粮食安全角度来讲,水源区内耕地面积应该保持一定规模,因此,划定农田保护红线,改进农业设施等措施提高粮食产量,保障粮食供给,与此同时,也应对由于调水工程淹没的农田区域给予一定的补偿,此外,也应当注意保护生态系统的连通性和完整性,以免对大坝上下的物种流动和区域食物链造成不可估量的影响。随着社会经济的发展和生态系统认识的深化,在满足社会发展、粮食安全、以及调水工程顺利进行的前提下,应及时调整发展策略,对资源进行合理优化配置,从而维持整个区域生态系统服务的健康运行,达到生态与社会发展的平衡发展。

当前,生态补偿机制并不完善^[47],水源区生态系统服务价值及权衡协同关系变化特征可以为水源区确立生态补偿上限标准和支付标准提供核算依据,以调水工程引起的生态恢复所新增或减少的生态系统服务作为生态补偿数量的理论限值,为构建和完善水源区生态补偿机制提供支持,以促进智慧调水。

5 结论

本文采用 Costanza 等提出的生态系统服务价值估算方法,用农田生产服务价值对谢高地等提出的“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”进行了系数修正,以此为基础估算了丹江口水源区内 1990—2015 年(1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2010 年、2015)6 个时期的 10 种生态系统服务价值及其时空变化特征。然后,基于以长时间整体分析占优的相关性分析方法和短时期动态变化分析占优的 ESTD 模型,分析了不同时期水源区内各类型生态系统服务之间的权衡与协同关系。结果显示:

(1)1990—1995 年,丹江口水源区生态系统服务价值呈负增长,1995—2015 年呈不断上涨的时序变化趋势,年均增长率为 2.36%。从各类用地提供的生态系统服务价值来看,林地的生态系统服务价值最高,其次为草地、水域、农田、建设用地和荒漠。

(2)水源区生态系统服务价值呈现明显的东南高西北低特征,随着时间的推移,生态系统极高值的范围有扩大的趋势。1990—2015 年各网格的生态系统服务价值动态变化度的空间分布与用地类型的分布较为吻合,林草地的变化度较高,农田的变化度较低。

(3)在丹江口水源区生态系统服务之间相互关系中,协同关系占 64%,表明协同关系是丹江口水源区生态系统服务之间的主导关系。协同关系主要存在于调节服务、支持服务与其他类型的生态系统服务的关系之中。权衡关系主要与供给服务有关。

(4)2005 年之后的时期,水资源供给、水文调节以及净化环境与生态系统服务之间的权衡关系增多,除这 3 种生态系统服务外,其余几种单项生态系统服务与生态系统服务之间的权衡关系减少。总体上水源区内生态系统之间的协同关系增加,权衡关系减少。人为扰动因素是生态系统服务变化的最重要因素。

参考文献(References):

- [1] Study of Critical Environmental Problems (SCEP). Study of Critical Environmental Problems. Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action. Cambridge: Massachusetts, MIT Press, 1970: 22-23.
- [2] Daily G C. Introduction: what are ecosystem services? //Daily G C, ed. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997: 1-10.

- [3] 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.
- [4] Schmalz B, Kruse M, Kiesel J, Müller F, Fohrer N. Water-related ecosystem services in Western Siberian lowland basins——analysing and mapping spatial and seasonal effects on regulating services based on ecohydrological modelling results. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 55-56.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems & Human Well-Being: Synthesis Report*. 2nd ed. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [6] Roger F, Adrian M, Nicole G Trade-offs in linking adaptation and mitigation in the forests of the Congo Basin. *Regional Environmental Change*, 2017, 17: 851-863.
- [7] 岳耀杰, 闫维娜, 王秀红, 申元村, 仇梦梦, 周兰, 栗健. 区域生态退耕对生态系统服务价值的影响——以宁夏盐池为例. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(2): 60-67.
- [8] Martínez M L, Pérez-Maquire O, Vázquez G, Castillo-Campos G, García-Franco J, Mehlreter K, Equihua M, Landgrave R. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 1856-1863.
- [9] Di Sabatino A, Coscieme L, Vignini P, Cicolani B. Scale and ecological dependence of ecosystem services evaluation: spatial extension and economic value of freshwater ecosystems in Italy. *Ecological Indicators*, 2013, 32: 259-263.
- [10] 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*, 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.05.005. (in Press)
- [11] Langner A, Irauschek F, Perez S, Pardos M, Zlatanov T, Öhman K, Nordström E M, Lexer M J. Value-based ecosystem service trade-offs in multi-objective management in European mountain forests. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 245-257.
- [12] 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.
- [13] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 张静. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析——以银川盆地为例. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1731-1738.
- [14] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M, Mooney H A. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [15] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [16] 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.
- [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] Reed M S, Hubacek K, Bonn A, Burt T P, Holden J, Stringer L C, Beharry-Borg N, Buckmaster S, Chapman D, Chapman P J, Clay G D, Cornell S J, Dougill A J, Evelyn A C, Fraser E D G, Jin N, Irvine B J, Kirkby M J, Kunin W E, Prell C, Quinn C H, Slee B, Stagl S, Termansen M, Thorp S, Worrall F. Anticipating and managing future trade-offs and complementarities between ecosystem services. *Ecology and Society*, 2013, 18(1): 5.
- [19] Byron C J, Jin D, Dalton T M. An integrated ecological-economic modeling framework for the sustainable management of oyster farming. *Aquaculture*, 2015, 447: 15-22.
- [20] 李思悦, 刘文治, 顾胜, 韩鸿印, 张全发. 南水北调中线水源地汉江上游流域主要生态环境问题及对策. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(3): 275-280.
- [21] 李亦秋. 基于 3S 技术的丹江口库区及上游生态系统服务价值评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [22] 陈姗姗. 南水北调水源地水源涵养与水土保持生态系统服务功能研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [23] 闫峰陵, 雷少平, 罗小勇, 邱凉, 樊皓. 丹江口库区水土保持的生态服务功能价值估算研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(10): 1206-1210.
- [24] 李亦秋, 邓欧, 张冬有, 韩德梁, 冯仲科. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟. *农业工程学报*, 2010, 27(5): 329-335, 399-399.
- [25] 杨晓楠. 渭河流域(关天段)生态系统服务时空变化及权衡优化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [26] 杨永德, 邹宁, 郭希望, 胡琴. 汉江上游水文特性的初步分析. *水文*, 1997, (2): 54-56.
- [27] 沈大军, 刘昌明. 南水北调中线工程不同调水规模对汉江中下游影响分析. *地理学报*, 1998, 53(4): 341-348.
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 2011 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [29] 国家发展和改革委员会. 全国农产品成本收益资料汇编 2011. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [30] 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.
- [31] 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.

- [32] 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.
- [33] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明. 植物生态学报, 2002, 26(2): 243-249.
- [34] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [35] 申怀飞, 侯刚, 翟书梅, 程昌甫. 南水北调中线水源区土地利用/覆被变化及其驱动因素分析. 贵州农业科学, 2013, 41(6): 167-171.
- [36] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 汪海洲. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角. 资源科学, 2015, 37(4): 792-804.
- [37] 张静, 任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因. 生态学报, 2016, 36(23): 7667-7677.
- [38] 段瑞娟, 郝晋珉, 张洁瑕. 北京区位土地利用与生态服务价值变化研究. 农业工程学报, 2006, 22(9): 21-28.
- [39] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 黄宏胜, 魏晓华, 吕添贵, 许莉. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化. 生态学报, 2013, 33(9): 2761-2767.
- [40] 杨晓楠, 李晶, 秦克玉, 李婷, 刘婧雅. 关中—天水经济区生态系统服务的权衡关系. 地理学报, 2015, 70(11): 1762-1773.
- [41] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男. 关中盆地生态服务权衡与协同时空差异. 资源科学, 2016, 38(11): 2127-2136.
- [42] 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.
- [43] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.
- [44] 刘宁. 南水北调中线一期工程丹江口大坝加高方案的论证与决策. 水利学报, 2006, 37(8): 899-905.
- [45] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 大坝对下游景观格局及生态系统服务的影响. 生态学杂志, 2017, 36(1): 240-247.
- [46] Wootton J T, Parker M E, Power M E. Effects of disturbance on river food webs. *Science*, 1996, 273(5281): 1558-1561.
- [47] 李雪松, 李婷婷. 南水北调中线工程水源地市场化生态补偿机制研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(S1): 66-72.