

湖库水源地流域生态系统服务权衡与多目标优化 ——以天目湖流域为例¹

徐静^{1,2,3} 杨桂山^{1,2,3*} 许晨^{1,2,3,4} 李恒鹏^{1,2,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学南京学院, 江苏南京 211135;

4. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 江苏苏州 215009)

【摘要】:协调各生态系统服务的权衡关系是进行生态系统有效管理、实现可持续发展的关键。采用模型评估法和价值评估法等评估了天目湖流域 2019 年水源涵养、水质净化、土壤保持、固碳和供给等五项重要生态系统服务,分析了各服务之间的权衡协同关系,采用多目标遗传算法(NSGA- II)对水质净化服务和供给服务进行优化。结果表明:(1)天目湖流域水源涵养、水质净化、土壤保持和固碳服务呈现“南高-北低”的空间分布特征,与植被覆盖度存在明显的正相关性;而供给服务的高值主要分布在流域中部和河流沿岸,与茶园和耕地分布密切相关。(2)水源涵养、水质净化、土壤保持和固碳服务两两之间表现为协同关系,供给服务与其他服务之间均呈现为权衡关系,其中与水质净化之间的权衡关系最强,表现为流域内最为突出的矛盾关系。(3)NSGA- II 算法为研究区生态系统服务优化提供了 4 种方案,可以在不同程度上化解流域内水质优化和经济产出之间的矛盾关系,为天目湖流域乃至其他湖库型水源地流域面向供水安全的生态系统可持续管理提供了新的思路和方法。

【关键词】:生态系统服务;权衡与协同;多目标优化;NSGA- II;天目湖流域

【中图分类号】:X524 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0062- 09

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301006

随着人类对自然环境的影响加剧,全球超过一半的生态系统服务正在退化^[1]。其主要原因之一是对生态系统服务的管理目标和规划程序缺乏明确和透明的定义,从而缺乏有效管理^[2,3]。由于生态系统类型的多样化及其相互关系的复杂性,当以牺牲一种

¹ **【收稿日期】**: 2022- 01- 14; **【修回日期】**: 2022- 03-04

【基金项目】: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23020201)

【作者简介】: 徐 静(1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域环境生态治理. E- mail: xujing19@mails.ucas.ac.cn

【* 通讯作者 E- mail】: gsyang@niglas.ac.cn

生态系统服务为代价来增强另一种生态系统服务时,就会发生权衡^[4,5,6]。理解并量化生态系统服务之间的相互关系有助于土地利用调控并促进可持续管理^[7,8]。目前的研究多停留在描述性阶段,不同生态系统服务之间相互关系尚不清晰,如何协调生态系统服务权衡之间的关系以实现双赢成为挑战^[9]。

目前的研究中大多通过景观调控、多目标优化和政策干预等方法来协调生态系统服务之间的权衡^[9]。其中多目标优化方法因其在多尺度上协调多种要素和多个目标之间的权衡问题而被广泛使用^[10,11],近年来该方法被生态学领域引入使用^[12,13],尤其在土地利用优化布局和规划方面^[14,15,16,17,18],如 Kennedy 等^[19]通过对经济和环境目标进行联合规划,可以减轻水质净化、生物多样性保护和农业供给服务之间的权衡。Elliot 等^[20]结合利益相关者建立多目标线性规划模型,为城市生态系统服务空间优化提供新方法。但现有的研究大多采用传统多目标优化方法,存在构建的函数简单,目标不够具体等问题^[21],多目标遗传算法的应用一定程度上弥补了这些不足,NSGA-II 算法是目前较为成熟的遗传算法,可以兼顾相互矛盾的目标构建数学模型进行优化的研究,在土地利用规划中获得广泛应用^[22,23,24,25]。Lautenbach 等^[22]基于 NSGA-II 算法在德国帕尔特流域,建立了水质、水量和粮食生产之间的目标函数,为流域耕地生产优化提供可选择的方案。湖库型水源地及其流域在保障区域水安全中具有至关重要的作用,具有较高的生态服务价值。如何通过权衡水质净化与其他生态系统服务,实现流域生态系统服务多目标优化和协同提升成为亟待研究的课题。

天目湖流域是太湖上游典型的湖库型水源地流域,存在着供给服务不断增加导致水质净化服务下降,威胁水源地供水安全的问题^[26,27,28]。本文以天目湖流域为研究区,在生态系统服务评估和权衡协同关系分析的基础上,以水源地供给安全保障为目标,开展生态系统服务权衡优化,获得了天目湖流域生态系统服务提升优化方案,为天目湖流域乃至其他湖库型水源地流域生态系统可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天目湖流域属于太湖水系,位于天目山余脉西部,全区以低山丘陵为主,横跨江苏溧阳和安徽广德、郎溪三个县市,流域总面积约 24 518 hm^2 ,是典型的北亚热带季风气候,雨量充沛,年均降水量 1 149.7 mm,主要集中在 5~9 月,年均温度 17.5℃,全区森林覆盖率高,物种资源丰富,地带性土壤为黄棕壤,厚度为 50~80 cm,保水保肥性差,耕作层浅,易被水冲刷导致水土流失。流域内的沙河、大溪等 2 座国家级大型水库是溧阳市 80 万居民的饮用水水源地。研究区土地利用现状如下所示(图 1)。

1.2 数据来源与预处理

土地利用数据源于中科院南京地理与湖泊研究所天目湖流域生态观测站,土地利用类型分为水体(3 375.60 hm^2)、森林(13 430.1 hm^2)、灌木林(129.3 hm^2)、茶园(2 254.9 hm^2)、园地(1 184.5 hm^2)、水田(1 529.5 hm^2)、旱地(135.2 hm^2)、草地(140.4 hm^2)、湿地(16.2 hm^2)、建设用地(1 908.8 hm^2)、未利用地(11.3 hm^2)11 类。气象数据来源于天目湖监测站和十思源监测站,主要参数包括 2010~2019 年月均降水、温度、潜在蒸散等。2019 年 NDVI 数据采用了 Landsat 7 ETM+、Landsat 8 OLI 遥感数据通过条带修复,去云拼接等预处理后,提取得到月 NDVI 数据。DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),通过 ArcGIS10.7 对 DEM 数据进行拼接,裁剪,然后重采样获得研究区 DEM 数据。土壤数据源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)^[29,30],主要参数包括土壤沙粒(SAND)、粉粒(SILT)、粘粒(CLAY)、有机碳(SOC),转化获得有机质(OM),经过计算获得研究区的土壤属性数据。

1.3 生态系统服务评估方法

根据天目湖流域的生态系统服务需求——保障饮用水源安全,改善生态环境,引导经济可持续发展,选择了水源涵养、水

质净化、土壤保持、固碳、供给 5 个关键生态系统服务，运用 InVEST 模型、CASA 模型、价值评估等方法对生态系统服务进行评估。

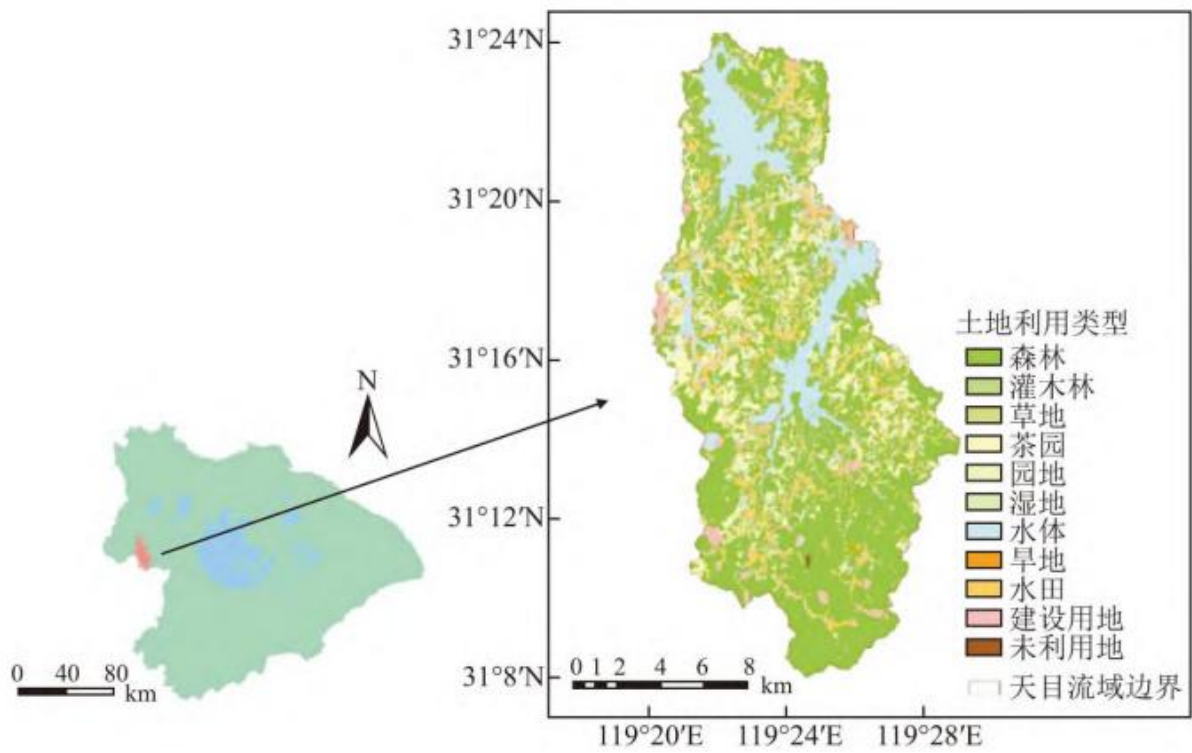


图 1 2019 年天目湖流域土地利用类型
Fig. 1 Land use of Tianmu Lake catchment in 2019

1.3.1 InVEST 模型

水源涵养利用模型的产水量模块计算得到产水量，再利用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数修正得到水源涵养量。水质净化通过模型对应模块估算植被土壤对 N、P 营养物质的持留能力反映每个景观地块上的水质净化程度，由于氮磷是人为造成的主要污染物，磷的数据可用性有限，故本文以流域氮输出系数来表示其水质净化能力。土壤保持利用模型中土壤保持模块计算每个景观斑块的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量，两者相减得到土壤保持量。本文将自然植被地表水土保持措施因子赋值为 1，认为建设用地和水域是无侵蚀区域，赋值为 0，其他用地类型根据生产活动情况及他人研究成果确定，其值越大，表示土壤侵蚀越严重[31, 32, 33]。

1.3.2 CASA 模型

CASA 模型主要利用植被指数、气象数据、太阳辐射、土壤类型属性数据来估算植被 NPP。模型中参数根据基础数据及相关研究成果确定，各用地类型 NDVI 的最大值和最小值通过实际 NDVI 数据及朱文泉研究成果[34, 35]整合得到，FPAR_{max} 和 FPAR_{min} 与植被类型无关，分别为 0.001 和 0.95，SR 由 NDVI 计算得到，实际光能利用率则通过气象数据计算水分和温度胁迫因子获得。

1.3.3 供给服务评估

天目湖作为供水水源地，库区大面积禁渔，流域供给服务主要体现在农林和茶果产出^[36]。研究以归一化植被指数 (NDVI) 作为分配指标，将总经济产值分配到水田、旱地、林地、园地上来估算土地利用的供给服务。

1.4 生态系统服务权衡协同分析

基于 ArcGIS 软件，在研究区范围产生 1 000 个随机点，并将边界距离设置为 200 m 以降低空间自相关性的影响，然后通过 SPSS 软件采用 Spearman 相关系数量化不同生态系统服务之间的相关关系。

1.5 优化方法

利用多目标遗传算法 NSGA-II 对天目湖流域的土地利用进行优化研究，该算法是 Deb 等^[37]在 NSGA 算法的基础上进一步完善提出的，采用了新的等级划分原理，降低计算复杂度，并引入了精英保留策略。由于流域粮食生产以水田为主，旱地面积仅占总面积的 0.6%，故将旱地并入园地作为一个决策变量，最终根据研究目标及实际数据的可获得性，选择了水田 (x1)、园地 (x2)、林地 (森林、灌木林) (x3)、茶园 (x4) 4 个决策变量。

1.5.1 目标函数设置

根据天目湖流域的生态系统服务相互关系分析结果及流域的生态定位和实际需求，本文选择了水质净化和供给服务作为优化目标，利用 NSGA-II 算法进行优化求解。

(1) 水质净化服务目标

天目湖流域是溧阳市重要的饮用水水源地，水质净化能力是重要的生态系统服务，将 N 输出值表示为 Y1，根据评估结果确定不同用地类型的 N 输出系数，目标函数表示为：

$$\begin{aligned} \text{MIN}(Y_1) &= \sum_{i=1}^4 a_i x_i \\ Y_1 &= 24.16x_1 + 27.07x_2 + 1.74x_3 + 40.85x_4 \end{aligned}$$

式中：Y1 表示 N 元素输出量 (kg)； a_i 表示第 i 类土地利用类型的 N 输出系数 (kg/hm²)； x_i 表示土地利用类型面积 (hm²)。

(2) 供给服务目标

天目湖流域土地关系紧张，其中茶园作为溧阳的特色产业，产生了巨大的经济价值，同时也造成了大量的污染物输出。本文将流域供给价值表示为 Y2，根据评估结果确定不同用地类型的单位面积供给服务价值，目标函数表示为：

$$\begin{aligned} \text{MAX}(Y_2) &= \sum_{i=1}^4 b_i x_i \\ Y_2 &= 60.44x_1 + 70.02x_2 + 2.28x_3 + 363.61x_4 \end{aligned}$$

式中：Y2 表示供给服务总价值(元);bi 表示第 i 类土地利用类型的单位面积供给服务价值 (千元/hm²);xi 表示土地利用类型面积(hm²)。

1.5.2 约束条件

为了使优化结果更为合理准确，本文设置了约束条件如下：

(1) 总面积约束

因为自变量只涉及到水田、园地(旱地)、林地、茶园，所以土地利用类型的面积：

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 18\,663.47 \text{ hm}^2$$

(2) 非负约束

$$x_i \geq 0$$

(3) 水田 x1 约束

天目湖流域的粮食产出以水田为主，水田大量沿入湖河道分布，其中超过 80%的水田分布在入湖河道沿岸 500 m 范围内，对水源地水质造成较大影响。本文将两大水库主要入库河道上溯 2 000 m 河段，沿河两侧 300 、500 m 以内的水田实行退耕，设置为两种退耕情景下的水田约束。

情景 1:300 m 以内水田退耕，300 m 以内水田有 395 hm²，故约束条件为：

$$x_1 \geq 1\,134.5 \text{ hm}^2$$

情景 2:500 m 以内水田退耕，500 m 以内水田有 563.9 hm²，故约束条件为：

$$x_1 \geq 965.6 \text{ hm}^2$$

(4) 林地 x4 约束

研究区属于重要生态保护区，林地提供了重要的生态功能，设置林地面积不减少作为约束：

$$x_4 \geq 13\,559.39 \text{ hm}^2$$

2 结果分析

2.1 生态系统服务评估结果

生态系统服务评估结果如图 2 所示，各土地利用类型的五项生态系统服务如表 1 所示。从评估结果可以看出，天目湖流域的水源涵养功能较高，平均值为 197.25 mm，其中高值区主要分布在流域南部，主要土地利用类型为森林，具有较高的植被郁闭度和冠层密度，可以有效拦截降水，减少地表径流，从而增加水源涵养。

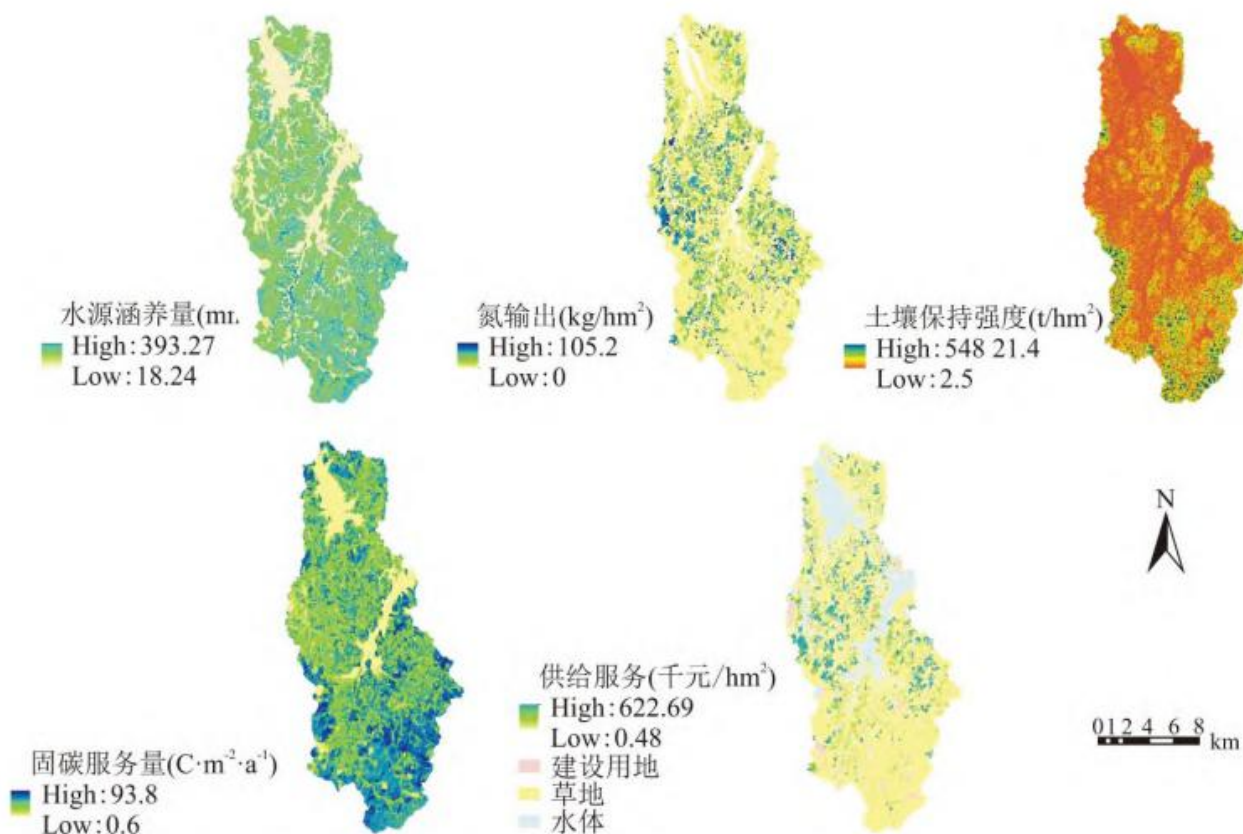


图 2 天目湖流域生态系统服务空间分布

Fig. 2 Spatial patterns of the key ecosystem services in Tianmu Lake catchment

表 1 天目湖流域各土地利用类型生态系统服务

	水源涵养 (mm)	水质净化 (kg/hm ²)	土壤保持 (t/hm ²)	固碳服务 (gC/m ²)	供给服务 (千元/hm ²)
森林	356.67	1.74	1 334.41	551.01	2.28
灌木林	306.31	2.07	1 109.34	298.5	2.28
草地	266.65	5.34	1 076.13	248.2	—
茶园	235.49	40.85	732.61	247.7	363.61

旱地	143.13	11.26	560.7	277.35	59.68
水田	94.27	24.16	415.96	278.52	60.44
园地	251.49	27.07	714.43	276.06	72.02

氮输出与水质净化能力有明显的线性关系,氮输出量越大,表示该地区的水质净化能力越差。流域内氮输出强度均值为 9.83 kg/hm²,高值区分布在河道沿岸和流域中部地区,这里集中分布着茶园、园地和耕地,其中茶园的氮输出系数达到 40.85 kg/hm²,这与茶园大量的施肥密不可分。森林的氮输出系数仅为 1.74kg/hm²,主要由于其氮磷的输入较少,且枯枝落叶层以及植被根系均可以有效拦截过滤污染物。

流域平均土壤保持强度为 984.44 t/hm²,其中森林土壤保持能力最强,达到 1334.41 t/hm²,最低为水田,仅为 415.96 t/hm²。土壤保持服务分布呈现明显的“南高北低”,南部有大片森林,高大的冠层可以降低降雨的冲击力,发达的根系可以固定土壤,减少水土流失,耕地则存在频繁的作物更替,地表不能被长期覆被,同时,施肥和灌溉等活动也会加剧水土流失。

以植被净初级生产力(NPP)表示生态系统固碳服务,流域 2019 年的植被 NPP 最高值为 932.8gC·m⁻²。高值区集中分布在南部海拔较高的山区,该地区的植被以竹林和乔木林为主,光能利用率较高,可以更为有效参与固碳,越靠近人类活动区域,植被逐渐以草地、耕地为主,植被稀疏,光能利用率降低。

从供给服务评估结果来看,全流域农业生产均值为 55.61 千元/hm²,其中茶园的供给服务价值最大,达到 363.61 千元/hm²;森林供给价值最小,仅为 2.28 千元/hm²。主要原因在于研究区主要经济产物为茶叶,茶园在流域内广泛分布,带来了巨大的经济价值,而森林主要提供其他调节型服务。

结合天目湖流域植被覆盖度和 DEM 分布(图 3)可以看出水源涵养、土壤保持、水质净化、固碳,均与植被覆盖度的空间分布高度相似,存在明显的正相关关系,高植被覆盖度的区域生态环境较好,可以提供更高调节型生态系统服务,其中森林的植被覆盖度最高,主要分布在海拔相对较高的流域南部,海拔落差形成错落有致的生态系统,拥有更高的植被光热利用率,可以促进植被生长,进而影响生态系统服务。

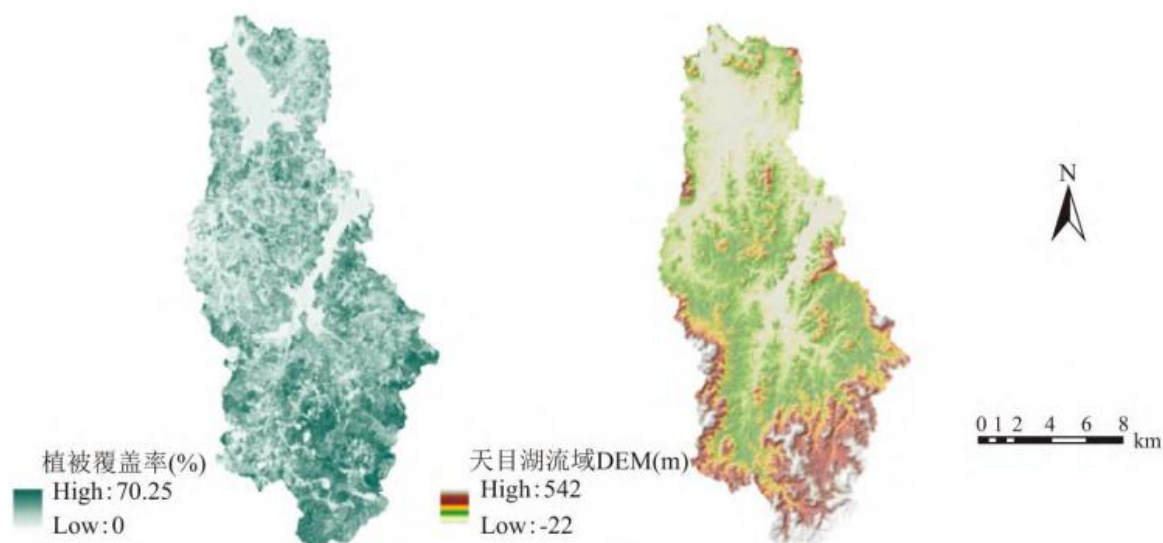


图3 天目湖流域植被覆盖度和DEM

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation coverage and DEM in Tianmu Lake catchment

2.2 生态系统服务权衡协同分析

本文以生态系统服务评估为基础,通过SPSS软件对生态系统服务进行相关分析,明确各服务之间的权衡协同关系,由于水质净化服务的能力与氮输出系数大小成反比,故将水质净化与其他服务的相关分析结果转为相反数,最终得到各生态系统服务之间的相关系数(表2)。可以看出,水源涵养、水质净化、土壤保持和固碳服务两两之间均表现为正相关性,为同增同长的协同关系,该四项服务均在生态环境较好的区域生态服务功能更高。

表2 天目湖流域五项生态系统服务相关系数矩阵

生态服务功能	固碳服务	水源涵养	水质净化	土壤保持	供给服务
固碳服务	1				
水源涵养	0.574**	1			
水质净化	0.657**	0.306**	1		
土壤保持	0.434**	0.541**	0.221**	1	
供给服务	-0.419**	-0.263**	-0.607**	-0.088*	1

注: **表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关。

供给服务与其他服务均表现为明显的负相关,为此消彼长的权衡关系。其中供给服务与水质净化之间的权衡关系最强,相关系数为 -0.607,表明水质净化与供给服务之间的冲突最为明显,是流域内亟待解决的矛盾关系,其中重要的原因之一在于茶园生产带来大量的经济效益的同时输出了大量污染物(表1)。

2.3 生态系统服务多目标优化

基于 NSGA-II 算法,将水质净化和供给服务两者作为优化目标,利用 MATLAB 软件进行代码的二次开发,求解得到多目标优化模型的非劣解集。结合流域的土地利用现状、流域规划等因素,筛选得到两者同时优化的解集,最终确定两种退耕情景下天目湖流域土地利用优化方案(表 3)。

从优化结果来看,在两种服务同时优化的情况下,茶园和林地面积有较大幅度的增加,园地面积则大幅度的减少。流域内水田主要沿河流分布,营养物质进入河流缺少缓冲区,带来大量污染物的同时不能产生较高的经济价值,多目标优化结果在退耕情景约束下适度减少了水田面积。流域内主要经济产出以茶园为主,园地不能带来更高的经济价值,优化后的园地大量较少,转化成为供给价值更高的茶园和水质净化能力更强的林地。

表 3 基于情景模拟的天目湖流域生态系统服务多目标优化结果

情景模拟	决策变量	X1	X2	X3	X4
	用地类型	水田	园地	林地	茶园
	优化前面积(hm ²)	1 529.5	1 184.45	13 559.393	2 254.94
情景 1	方案 1	1 140.87	15.88	14 913.30	2 593.81
	方案 2	1 162.49	39.62	14 676.51	2 785.23
	方案 3	1 146.28	22.74	14 551.60	2 943.25
	方案 4	1 155.90	30.50	14 376.66	3 100.81
情景 2	方案 1	980.79	29.80	15 018.18	2 635.10
	方案 2	976.94	18.07	14 744.55	2 924.31
	方案 3	980.98	20.39	14 543.34	3 119.14
	方案 4	979.61	20.70	14 377.96	3 285.59

茶园作为主要经济用地类型,增加茶园可以兼顾研究区经济发展的需求,在两种情景下,茶园面积均有所增加,其中在各情景中的方案 4 中最高增加了 864.2 和 845.9 hm²,此时供给服务增加了 25.5%和 20.1%,N 输出量则降低了 0.7%和 2.3%(表 4),可以在保障流域现有水质净化能力的情况下,最大程度提升流域的供给服务价值。

林地作为流域内的生态系统服务能力最高的用地类型,为维护流域的生态功能提供了重要支撑,林地面积在情景 1、2 最多增加 1 458.8 和 1 353.9 hm²,此时 N 输出量分别降低了 14.3%和 13.4%,供给服务增加 2.7%和 2%,在供给服务不降低的情况下,水质净化能力得到了大幅度的提升。各情景中的方案 2、3 则可以相对均衡的同时提升两个优化目标,从而达到双赢的目的。

表 4 中展示了各方案中的水质净化和供给服务的具体优化情况,两个退耕情景下,水质净化和供给服务提升的区间相差不大,供给可以提升 2%~25.5%,水质净化能力则可以提升 0.7%~14.3%,表明在协调相互权衡的目标时,优化目标不会无限制的提

升。

表 4 基于情景模拟的天目湖流域供给服务和水质净化服务优化方案及变化

情景模拟	优化方案	供给服务 (千元)	N 输出量 (kg)	供给变化 (%)	N 输出变化 (%)
情景 1	方案 1	1 053 756.1	158 277.9	2.7	-14.3
	方案 2	1 157 237.0	169 205.4	12.8	-8.4
	方案 3	1 228 029.2	176 975.0	19.7	-4.2
	方案 4	1 288 112.8	183 461.7	25.5	-0.7
情景 2	方案 1	1 047 202.5	159 899.6	2.0	-13.4
	方案 2	1 119 236.1	168 472.2	9.1	-8.8
	方案 3	1 174 244.3	173 861.0	14.4	-5.9
	方案 4	1 232 260.8	180 435.4	20.1	-2.3

注：其中水质净化能力以 N 输出量表示。

表 5 天目湖流域水质优化偏向性方案

决策变量	X1	X2	X3	X4	供给变化 (%)	N 输出变化 (%)
情景 1	1 154.72	46.10	15 200.12	2 262.92	-9.3	-20.0
情景 2	998.77	47.15	15 330.05	2 287.89	-9.3	-21.2

3 讨论

本文的研究结果为协调天目湖流域水质净化与供给服务之间的矛盾，提供了可选择的方案，优化方案之间如何抉择，需要参考研究区的实际需求、公众意愿以及专家的评议等诸多因素。表 5 则显示了具有强烈偏向性需求的优化方案，可以降低少量供给服务而大幅度提升水质净化服务，研究发现林地具有较高的水质净化能力，将水体附近及价值量较低的茶园转换为林地，可以更加有效降低流域内的氮输出。

NSGA-II 算法体现了它在协调生态系统权衡冲突问题上的可行性和优越性，实际规划中存在的其他限制因素，都可以在建模过程中得到体现和完善，本文基于保障水源地水安全展开研究，约束条件设置较少，优化后园地大幅度削减，可能导致小区域特色农业发展受到影响。同时，天目湖流域为国家 5A 景区，旅游服务是其主要的经济产出之一，也会对流域供水安全造成威胁，后续研究可以在建模过程中将旅游服务、利益相关者的诉求纳入约束，形成更为精准的优化方案。

此外,由于研究区范围较小,自然环境复杂,供给服务中只考虑了用地类型的实际产出,未将建设用地等纳入评估,可能导致流域内总体服务价值被低估,同时,模型的评估与监测值之间存在一定误差,后续研究中可以基于实际本底数据进行调整,或采用小流域模型得到更精确的评估结果。

4 结论

本文利用相关分析阐明了流域内最突出的权衡关系,并采用 NSGA-II 算法以水质净化和供给服务为优化目标,探索研究区生态系统协调优化的方案。研究表明:天目湖流域生态系统服务量较高,水源涵养、水质净化、土壤保持和固碳具有相似的空间分布特征,高值主要分布在流域南部海拔较高的丘陵地区,与植被覆盖度存在明显的正相关性,其中林地具有更高的生态系统服务,供给服务主要有茶园提供,与茶园空间分布密切相关。从相关性分析来看,固碳与水源涵养、水质净化的协同关系最为明显,供给服务与其他服务之间为此消彼长的权衡关系,其中与水质净化之间的相关性最为显著,是流域内最为突出的矛盾关系。NSGA-II 算法在两种退耕情景下为研究区生态系统服务优化提供了 4 种优化方案,均在一定程度上化解了流域内水质净化服务和供给服务之间的矛盾,供给服务最高可提升 25.5%,N 输出量最多可减少 14.3%,为流域生态系统可持续管理提供了科学依据。

参考文献

- [1] (PROGRAM) M E A.Ecosystems and human well-being:Synthesis[M].Washington,DC:Island Press,2005.
- [2] 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[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446. FU B J,ZHANG L W.Land-use change and ecosystem services:Concepts,methods and progress[J].Progress in Geography,2014,33(4):441-446.
- [3] LANGNER A,IRAUSCHEK F,PEREZ S,et al.Value-based ecosystem service trade-offs in multi-objective management in European Mountain forests[J].Ecosystem Services,2017,26:245-257.
- [4] 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.
- [5] JUUTINEN A,SAARIMAA M,OJANEN P,et al.Trade-offs between economic returns,biodiversity,and ecosystem services in the selection of energy peat production sites[J].Ecosystem Services,2019,40:101027.
- [6] HOWE C,SUICH H,VIRA B,et al.Creating win-wins from trade-offs?Ecosystem services for human well-being:A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J].Global Environmental Change,2014,28:263-275.
- [7] DÍAZ-YÁÑEZ O,PUKKALA T,PACKALEN P,et al.Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services[J].Forestry:an International Journal of Forest Research,2021,94(3):386-394.
- [8] ZHENG H,WANG L,WU T.Coordinating ecosystem service trade-offs to achieve win-win outcomes:A review of the approaches[J].Journal of Environmental Sciences (China),2019,82:103-112.
- [9] BENNETT E M,PETERSON G D,GORDON L J.Understanding relationships among multiple ecosystem services[J].Ecology Letters,2009,12(12):1394-1404.

-
- [10] JOHNSON J A, RUNGE C F, SENAUER B, et al. Global agriculture and carbon trade-offs[J]. PNAS, 2014, 111(34):12342-12347.
- [11] LI M, GUO P. A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(19/20):4897-4911.
- [12] BEHRMAN K D, JUENGER T E, KINIRY J R, et al. Spatial land use trade-offs for maintenance of biodiversity, biofuel, and agriculture[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(10):1987-1999.
- [13] POHJANMIES T, EYVINDSON K, TRIVIÑO M, et al. More is more? Forest management allocation at different spatial scales to mitigate conflicts between ecosystem services[J]. Landscape Ecology, 2017, 32(12):2337-2349.
- [14] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2012, 32(21):6755-6766. MENG J J, ZHU L K, YANG Q, et al. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21):6755-6766.
- [15] LAW E A, BRYAN B A, MEIJAARD E, et al. Mixed policies give more options in multifunctional tropical forest landscapes[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(1):51-60.
- [16] 包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J]. 生态学报, 2018, 38(3):812-828. BAO R, LIU F, ZHANG J P, et al. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3):812-828.
- [17] KENNEDY C M, HAWTHORNE P L, MITEVA D A, et al. Optimizing land use decision-making to sustain Brazilian agricultural profits, biodiversity and ecosystem services[J]. Biological Conservation, 2016, 204:221-230.
- [18] EWING P M, RUNCK B C. Optimizing nitrogen rates in the Midwestern United States for maximum ecosystem value[J]. Ecology and Society, 2015, 20:art18.
- [19] KENNEDY C M, MITEVA D A, BAUMGARTEN L, et al. Bigger is better: Improved nature conservation and economic returns from landscape-level mitigation[J]. Science Advances, 2016, 2(7):e1501021.
- [20] ELLIOT T, BERTRAND A, BABÍ ALMENAR J, et al. Spatial optimisation of urban ecosystem services through integrated participatory and multi-objective integer linear programming[J]. Ecological Modelling, 2019, 409:108774.
- [21] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006:6-12. CUI X X. Multiobjective evolutionary algorithms and their applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:6-12.
- [22] LAUTENBACH S, VOLK M, STRAUCH M, et al. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48:98-112.
- [23] SHAYGAN M, ALIMOHAMMADI A, MANSOURIAN A, et al. Spatial multi-objective optimization approach for land use

allocation using NSGA-II[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(3):906-916.

[24] LAZOGLU M, KOLOKOUSIS P, DIMOPOULOU E. Investigating the use of a modified NSGA-II solution for land-use planning in Mediterranean Islands[J]. Journal of Geographic Information System, 2016, 8(3):369-386.

[25] 孙会航, 李俐频, 田禹, 等. 基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10):3605-3614. SUN H H, LI L P, TIAN Y, et al. Sponge city planning and design based on multi-objective optimization and comprehensive evaluation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10):3605-3614.

[26] 李恒鹏, 朱广伟, 陈伟民, 等. 中国东南丘陵山区水质良好水库现状与天目湖保护实践[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6):775-784. LI H P, ZHU G W, CHEN W M, et al. Current situation of good water quality reservoirs in hilly region of south-east China: Protection practices of Tianmuhu Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6):775-784.

[27] 朱颖, 林静雅, 胡义涛, 等. 天目湖流域景观格局时空变化及生态系统服务价值分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4):239-245. ZHU Y, LIN J Y, HU Y T, et al. Studies on spatiotemporal change of landscape pattern and ecosystem service value in Tianmuhu watershed[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4):239-245.

[28] 李恒鹏, 陈伟民, 杨桂山, 等. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理——以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6):785-798. LI H P, CHEN W M, YANG G S, et al. Reduction of nitrogen and phosphorus emission and zoning management targeting at water quality of lake or reservoir systems: A case study of Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir area[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6):785-798.

[29] LIU F, WU H, ZHAO Y, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin, 2022, 67(3):328-340.

[30] LIU F, ZHANG G, SONG X, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. Geoderma, 2020, 361:114061.

[31] 李军玲, 邹春辉. 基于 GIS 的河南省土壤侵蚀定量评估研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5):1161-1164. LI J L, ZOU C H. Quantitative study of soil erosion in Henan Province based on GIS[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5):1161-1164.

[32] 何耀帮, 赵永兰, 田国行, 等. 基于 RS 和 GIS 的伊河流域土壤侵蚀研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20):237-242. HE Y B, ZHAO Y L, TIAN G H, et al. Study on soil erosion of Yihe valley based on RS and GIS[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20):237-242.

[33] 程先富, 余芬. 安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2010, 29(8):1461-1470. CHENG X F, YU F. Spatial distribution of soil erosion and its relationship to environment factors in Anhui Province[J]. Geographical Research, 2010, 29(8):1461-1470.

[34] 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[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3):413-424. ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote

sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3):413-424.

[35] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3):296-300. ZHU W Q, CHEN Y H, XU D, et al. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(3):296-300.

[36] 吕荣芳. 宁夏沿黄城市带生态系统服务时空权衡关系及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. LV R F. Spatial-temporal associations among ecosystem services and their driving mechanisms: A case study in the city belt along the yellow river in Ningxia[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[37] DED K, DATTA D, FONSECA C M, et al. Multi-objective evolutionary algorithm for land-use management problem[J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2007, 3(4):1-24.