

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.017.

张铭丹, 李运刚. 瑞丽江-大盈江流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 415-422.

Zhang Mingdan, Li Yungang. Study on Ecosystem Service Trade-off/Synergy Relationship in Ruili-Daying River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 415-422.

瑞丽江-大盈江流域生态系统服务权衡与协同关系研究

张铭丹¹, 李运刚²

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091;

2. 云南大学 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650504)

摘要: [目的] 揭示两江流域(瑞丽江-大盈江)生态系统服务权衡与协同关系, 进而为该区域土地管理与生态系统服务优化提供理论依据。 [方法] 基于土地利用、气象、地形和土壤等多源数据, 利用 InVEST 模型对 2000 年、2010 年、2020 年水源供给、土壤保持和碳储存 3 类服务进行量化评估, 并运用空间叠置方法探讨了生态系统服务权衡与协同关系。 [结果] (1) 2000—2020 年两江流域土地利用变化主要表现为林地、耕地、草地、湿地和裸地减少, 灌木林、建设用地和水体增加。(2) 两江流域水源供给、土壤保持和碳储存服务多年平均值分别为 749.60 mm, 365.78 t/hm², 137.51 t/hm²。20 a 间, 水源供给和土壤保持呈先增后减变化, 碳储量变化不明显。(3) 不同土地利用类型提供的生态系统服务具有差异性, 单位面积下建设用地、灌木地和林地分别提供了最高的水源供给量、土壤保持量和碳储存量。(4) 两江流域生态系统服务关系以权衡关系为主。其中强权衡区域比例高达 55%, 弱权衡区域比例为 4%~8%, 低协同区域占比为 24%~30%, 高协同区域占比为 10%~13%。研究时段内低协同地区所占比例减少了 5.78%, 弱权衡、强权衡和高协同地区所占比例分别增加了 2.79%, 0.79%, 2.2%。 [结论] 整个研究时段内两江流域的生态系统服务权衡程度有所加强, 但服务整体水平呈上升趋势。

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同; InVEST 模型; 瑞丽江-大盈江流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0415-08

Study on Ecosystem Service Trade-off/Synergy Relationship in Ruili-Daying River Basin

Zhang Mingdan¹, Li Yungang²

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650504, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the ecosystem service trade-offs and synergistic relationships in Ruili-Daying River basin, and to provide a theoretical basis for land management and ecosystem service optimization in this region. [Method] The InVEST model was used to quantitatively evaluate the ecosystem service of water yield, soil retention, and carbon storage in Ruili-Daying River Basin based on multi-source data including the land use and land cover, topography, meteorology and soil conditions covering 2000, 2010 and 2020. Moreover, the characteristics of trade-offs and synergies among different ecosystem services were analyzed by using the spatial overlay analysis method. [Results] (1) From 2000 to 2020, the areas of forest land, cropland, grassland, wetland and bare land decreased in Ruili-Daying River basin, while the shrubland, construction land and water bodies increased gradually. (2) The mean water supply depth, unit amount of soil retention and carbon storage were 749.60 mm, 365.78 t/hm², 137.51 t/hm², respectively. In

收稿日期: 2022-09-08

修回日期: 2022-10-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302405); 云南省基础研究计划项目(202001BB050073)

第一作者: 张铭丹(1997—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务。E-mail: Zhang_mingdan@163.com

通信作者: 李运刚(1983—), 男, 云南大理人, 博士, 研究员, 主要从事跨境流域水文变化与模拟研究。E-mail: ygli@ynu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

the past 20 years, the water yield and soil retention increased at first and then decreased, and the change of carbon storage was not obvious. (3) The ecosystem services provided by different land use types differentiated, with construction land, shrubland and forest land providing the highest water yield, soil retention capacity and carbon storage per unit area, respectively. (4) The ecosystem service relationship in Ruili-Daying River Basin was dominated by trade-offs, in which the proportion of severe trade-off areas was as high as 55%, the proportion of weak trade-off areas was about 4%~8%, the proportion of areas with poor synergy was about 24%~30%, and the proportion of areas with good synergy was about 10%~13%. During the study period, the proportion of with poor synergistic areas decreased by 5.78%, while the proportion of weakly trade-off, severely trade-off and well synergistic areas increased by 2.79%, 0.79% and 2.2%, respectively. [Conclusion] The degree of ecosystem service trade-offs in Ruili-Daying River basin was enhanced while the overall level of services was on an upward trend.

Keywords: ecosystem service; trade-off/synergy; InVEST model; Ruili-Daying River Basin

生态系统服务泛指人类直接或间接地从生态系统中获得的惠益,它是人类赖以生存和发展的资源环境基础^[1-2]。联合国千年生态系统评估项目将生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4类^[3]。不同类型的生态系统服务直接会相互影响,呈现出交织复杂的非线性关系,主要表现为此消彼长的权衡关系和同增同减的协同关系^[4]。深入认识生态系统服务间的相互关系对人类高效地开发利用自然资源以及区域全面协调可持续发展具有指导意义^[5]。

近年来,生态系统服务的权衡/协同关系逐渐成为研究热点,主要有以下特点:研究尺度从城市尺度、流域及区域尺度扩展到国家尺度;研究对象由两种生态系统服务逐渐发展至对多种生态系统服务整体间的权衡/协同关系研究;研究方法则包括统计描述法、空间统计制图法、模型模拟法和情景分析法等^[6-8]。如于媛等^[9]基于 InVEST 模型与权衡协同度模型,分析了哈长城市群 2000—2015 年水土保持、生态系统碳储量及产水量 3 种生态系统服务的时空分布及其权衡协同关系。王鹏涛等^[6]对汉江上游流域 2000—2013 年的水土保持服务、产水服务、植被碳固定服务进行空间制图,并基于逐像元偏相关的时空统计制图方法,对生态系统服务的权衡与协同关系时空变化进行定量分析。张静静等^[10]借助 CASA 模型和 InVEST 模型评估伏牛山地区森林生态系统服务,运用空间叠置方法从多个空间尺度探讨服务权衡与协同效应。王晓萌等^[11]基于 InVEST 模型计算 1985—2015 年河北省农作物生产、碳储量、生境质量和水土保持 4 种生态系统服务,并运用相关分析法、权衡协同度模型及双变量局部自相关方法识别不同尺度生态系统服务空间格局变化及权衡/协同关系。由于区域之间的自然景观差异和人类活动差异,生态系统服务在不同研究尺度、不同区域上的权衡与协同

关系亦存在差异性^[12]。

瑞丽江和大盈江(两江流域)属于伊洛瓦底江的重要支流。由于其特殊的地理位置和气候条件,两江流域亦是世界上生物多样性热点地区之一。在国家构建对外开放新格局战略中,两江流域处于中缅经济走廊发展主轴上,具备承东启西、南联北接“一带一路”的地缘禀赋。近年来该区成为水电能源建设、跨境交通运输体系(国际公路、铁路、油气管道)建设、生态屏障建设的关键区。气候变化和人类活动会加剧生态环境压力,协调区域经济发展与生态环境保护关系受到重视。本研究将借助 InVEST 模型量化评估 2000 年、2010 年、2020 年水源供给、土壤保持和碳储存 3 种生态系统服务,阐明土地利用与生态系统服务的时空格局和演变特征,揭示生态系统服务权衡/协同的时空关系,为流域生态保护和治理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

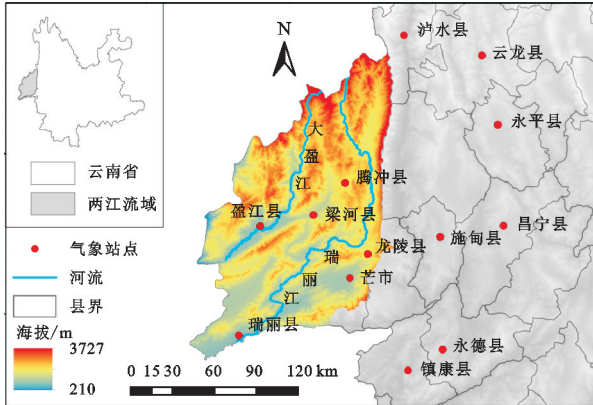
1.1 研究区概况

两江流域位于云南省西部(25°51'—23°50'N, 97°31'—98°52'E),流域北、西、南三面均与缅甸接壤,总流域面积约 17 274 km²(图 1)。该区为横断山脉的南延部分,地势西北高东南低。两江流域地处南亚热带季风气候区,多年平均年降水量 1 400~1 700 mm,年均气温 18.4~20℃。以阔叶林为主的森林面积占流域总面积的 70%以上,暖温带主要植被为常绿阔叶林,温带山地主要植被为灌木丛等。流域内土壤类型则涵盖了赤红壤、红壤、黄壤、黄棕壤等。流域内河谷盆地面积占比 17%,是傣、景颇、阿昌、德昂、傈僳 5 个世居少数民族聚居地。

1.2 数据来源

研究区 2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据来源于 GlobeLand30 全球地理信息公共产品(<http://www.>

globallandcover.com),空间分辨率为 30 m。研究区及周边 13 个气象站 1960—2020 年的逐日降水量、平均温度、平均相对湿度、地表 2 m 平均风速和日照时数等气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)。数字高程模型数据(DEM)来源于美国太空总署和国防部国家测绘局测量的 SRTM 数据,空间分辨率为 30 m(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD)中国 1:100 万土壤数据集(<http://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估方法

(1) 水源供给服务。InVEST 模型的水源供给(产水)模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设^[13-14],模型的计算原理见公式(1)~(4):

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right] P(x) \quad (1)$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left\{1 + \left[\frac{PET(x)}{P(x)}\right]^\omega\right\}^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (3)$$

$$R(x) = \frac{K(x)ET_o}{P(x)} \quad (4)$$

式中: $Y(x)$ 和 $P(x)$ 分别为研究区每个栅格单元 x 的年产量和年降水量; $AET(x)$ 和 $PET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸散量和潜在蒸散量; $AWC(x)$ 为土壤有效含水量; $\omega(x)$ 为自然气候-土壤性质的非物理参数; Z 为季节性因子,是与降雨季节分布有关的浮点型数据,其值域为 $[1, 30]$; $R(x)$ 为 Budyko 干燥指数,即潜在蒸散与降水量的比值; $K(x)$ 为栅格 x 的植被蒸散发系数; ET_o 为年平均参考作物蒸散发量。其中, ET_o 使用 Penman-Monteith 公式计算,土

壤根茎最大埋藏深度来源于土壤数据集;植物可利用含水量参考周文佐^[15]提出的计算公式;植物蒸散系数参照联合国粮农组织第 56 号文件^[16]与 InVEST 模型用户指南^[17]赋值。

(2) 土壤保持服务。土壤保持(输沙运移)模块是基于像元尺度的通用土壤流失方程(USLE)^[18],以栅格为基础单元估算土壤流失量,见公式(5)~(7):

$$SD = RKLS - ULSE \quad (5)$$

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS \quad (6)$$

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (7)$$

式中: R 为降水侵蚀性因子; K 为土壤可侵蚀性因子; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖和作物管理因子; P 为水土保持措施因子, C 和 P 因子值域均为 $[1, 30]$ 。其中 R 因子参考章文波等^[19]提出的公式计算; K 因子采用 Wischmeier 等^[20]提出的诺谟方程估算; C 和 P 因子参考彭建等^[21]的赋值。

(3) 碳储存服务。碳储量模块根据土地利用分类情况,分别对不同地类地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库的平均碳密度进行计算统计,然后用各个地类的面积乘以其碳密度并求和获得总碳储量。其计算公式如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (8)$$

式中: C_{total} 为流域总碳储量; C_{above} 为地上部分碳储量(土壤以上所有存活植物中的碳); C_{below} 为地下部分碳储量(存在于植物根系中的碳); C_{soil} 为土壤碳储量(分布于有机土壤和矿质土壤中的有机碳); C_{dead} 为死亡有机碳储量(凋落物、倒下或站立的已死亡树木中的碳),以上碳储量单位均为 t/hm^2 。本研究将总碳储量分为两部分来计算,土壤碳储量部分参考 Duan 等^[22]中所计算的云南省不同土壤类型在 0—20 cm 厚度的土壤有机碳密度数据计算,其余部分碳储量参考解宪丽等^[23-24]和李克让等^[25]研究中的碳密度数据。

1.3.2 空间叠置分析 空间叠置分析方法可识别服务权衡或协同的类型和区域,直观地展示多种服务之间权衡或协同关系的空间分异特征。按照自然间断点法将服务标准化的值分类为低、中、高,编号依次为 1, 2, 3;将 3 种服务标准化并分级后的栅格数据进行叠置,规则如下:

$$CODE = C \times 100 + W \times 10 + S \quad (9)$$

式中: C , W , S 分别为碳储存、水源供给和土壤保持服务;CODE 为三位数叠置代码,值位于 111, 333。参考张静静等^[10]的分级标准,研究将权衡划分为强权衡和弱权衡,协同划分为高协同和低协同。其中低协同关系(如 111)表明几种服务均处于较低水平,高协同为几种服务均处于高值水平的良好状态(如

333),是生态调节和治理的理想状况。而弱权衡与强权衡表明几种服务间的高低水平有所差异,强权衡为一种服务供给能力较强而其他较低的状态(如 311),弱权衡为 2 种服务能力较高而另一种服务较低的状态(如 331)。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

两江流域土地利用类型以林地、耕地和草地为主,分别占流域面积的 62%,23%,10%,其余土地利用类型仅占流域面积的 5%(图 2)。林地在流域内广泛分布,耕地则主要集中在河谷地带,草地主要分布在北部山地和南部河谷地区。由表 1 可知,耕地和草地呈现出先增加后减少的变化特征,且 2000—2010 年的增加面积低于 2010—2020 年的减少面积。20 a 间耕地和草地分别减少 123.49 km²,33.76 km²,变化率分别为 2.99%,2.00%。林地表现出先减少后增加的特征,且 2000—2010 年的减少面积高于 2010—2020 年的增加面积,导致 20 a 间林地面积减少 101.57 km²,变化率为 0.95%。2000—2020 年,灌木地、水体和建设

用地分别增加了 54.98 km²,46.18 km²,163.52 km²。灌木林主要由林地转化而来,其中 2000—2010 年增加面积高于 2010—2020 年的减少面积。水体和建设用地主要由耕地、林地、草地转化而来,水体面积增加主要集中在 2010—2020 年,而建筑面积在整个研究时段内均持续增加。总的来说,2000—2020 年两江流域土地利用结构变化主要表现为林地、耕地、湿地和草地减少,灌木林、建设用地和水体增加。

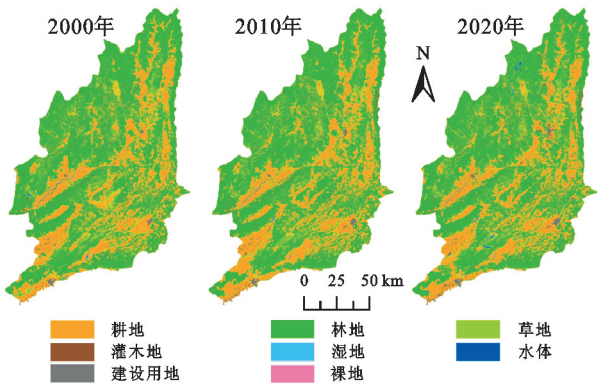


图 2 2000—2020 年两江流域土地利用变化

Fig. 2 Land use changes in Ruili-Daying River Basin from 2000 to 2020

表 1 2000—2020 年两江流域土地利用类型转移矩阵

Table 1 Transfer matrix of land use types in Ruili-Daying River Basin from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年 面积/km ²	2010 年 面积/km ²	2020 年 面积/km ²	2000—2010 年 变化量/km ²	2010—2020 年 变化量/km ²	2000—2020 年 变化量/km ²	2000—2020 年 变化率/%
耕地	4127.18	4142.45	4003.69	15.27	−138.76	−123.49	−2.99
林地	10745.8	10602.5	10644.3	−143.35	41.78	−101.57	−0.95
草地	1690.87	1707.2	1657.11	16.33	−50.09	−33.76	−2.00
灌木地	468.99	544.34	523.97	75.35	−20.37	54.98	11.72
湿地	1.62	0.68	1.35	−0.94	0.67	−0.27	−16.67
水体	66.97	59.4	113.15	−7.57	53.75	46.18	68.96
建设用地	164.62	213.16	328.14	48.54	114.98	163.52	99.33
裸地	5.58	0	0	−5.58	0	−5.58	−100.00

2.2 生态系统服务时空变化特征

两江流域水源供给多年平均值分别为 749.60 mm,最高值出现在 2010 年(874.69 mm),最低值出现在 2020 年(661.05 mm)(表 2)。以 2020 年为例,水源供给空间分布差异显著,总体呈现出由南向北递减的态势。以腾冲县北部为低值中心,产水量为 200~700 mm,而芒市和龙陵县为高值中心,产水量可达 1 700 mm 以上(图 3)。土壤保持多年平均值分别为 365.78 t/hm²,最高值出现在 2010 年(393.52 t/hm²),最低值出现在 2000 年(345.25 t/hm²)。土壤保持高值区主要分布于较高海拔的山地,如盈江县中部和德宏州芒市周边的山脉土壤保持量为 1 000~3 000 t/hm²,低值区集中在河谷和盆地,土壤保持量

通常低于 10 t/hm²。碳储存多年平均值分别为 137.51 t/hm²,最高值出现在 2000 年(138.09 t/hm²),最低值出现在 2010 年(137.14 t/hm²)。碳储存空间分布与土壤保持相似,北部高海拔山地的碳存储量为 220~350 t/hm²,而河谷盆地的碳储量仅在 60 t/hm² 以下。总的来说,水源供给空间布局和降水量分布较为一致,而土壤保持和碳储存总体上呈现山地高、河谷盆地低的空间格局。2000—2020 年水源供给和土壤保持呈先增后减变化的特征,而碳储存在研究时段内变化不明显。

2.3 不同土地利用类型的生态系统服务

将两江流域 3 项生态系统服务分别与不同土地利用类型进行叠加分析,得到不同土地利用类型单位

面积的生态系统服务差异(图 4)。总的来说,除了裸地外,其余几种土地利用类型的生态系统服务年际变化较小。同种土地利用类型在不同生态系统服务间的差异表现在:耕地、建设用地和裸地的水源供给占比高于土壤保持和碳储存占比;林地的土壤保持和碳储存占比大于水源供给占比;草地和灌木林地的水源供给和土壤保持占比大于碳储存占比;湿地的碳储存占比高于水源供给和土壤保持占比。对于同种生态系统服务,不同土地利用类型间同样具有明显差异。在水源供给、土壤保持和碳储存服务中,单位面积建设用地、灌木地和林地分别提供的生态系统服务最高。林地是两江流域的主要土地利用类型,植被覆盖率大、密度高,对土壤流失起较好的预防作用,同时地上植被、地下根系以及枯枝落叶中的碳密度也较高,是碳库的重要组成部分。上述结果与林世伟等^[26]在“三江并流”区的相关研究结论一致。

表 2 两江流域 2000—2020 年各项生态系统服务均值
Table 2 Average values of ecosystem services in Ruili-Daying River Basin from 2000 to 2020

年份	水源供给/ mm	土壤保持/ (t·hm ⁻²)	碳储存/ (t·hm ⁻²)
2000	713.05	345.25	138.09
2010	874.69	393.52	137.14
2020	661.05	358.57	137.31

2.4 生态系统服务权衡/协同效应分析

图 5 为两江流域生态系统服务权衡/协同关系空间分布。2000—2020 年两江流域生态系统服务关系以权衡为主,约为 60%,且权衡比例逐渐升高。其中强权衡区域比例始终高达 55% 上下,覆盖了绝大部分林地和建设用地。弱权衡区域占比在 20 a 间从 4.77% 缓慢增至 7.56%,主要集中于研究区域东侧的芒市北部和龙陵县一带,2020 年在盈江县和陇川县

的城镇外沿亦有所分布。低协同区域占比从 29.82% 下降至 24.04%,主要集中在耕地和水体,2000 年分布更加紧密聚集,如瑞丽、陇川、盈江和芒市等城镇的河网两岸及周边村庄,2010—2020 年分布愈加破碎零散,建设用地等地类随着时间推进转化为强权衡区域。高协同区域占比在研究时段内从 10.87% 增至 13.07%,多集中在高海拔地区,2000 年零星分布于研究区域东南侧,2020 年盈江县已有大面积权衡区域转化为高协同区域。在整个研究时段内,低协同地区所占比例减少了 5.78%,弱权衡、强权衡和高协同地区所占比例分别增加了 2.79%,0.79%,2.2%,表明流域内生态系统服务整体协同程度有所加强,生态环境呈好转趋势。2000 年以盈江县、陇川县、瑞丽市和芒市为代表的城镇中心地带 3 种服务供给能力都处于较低水平,但随着时间的推移低协同区域的密集程度有明显好转,显示出研究区域 20 a 来的生态修复机制与政策取得了一定成效。相较于相关使用空间叠置法评估生态系统服务权衡/协同效应研究^[27],两江流域在研究时段内权衡强/弱、协同高/低分布的空间分异变化不明显。

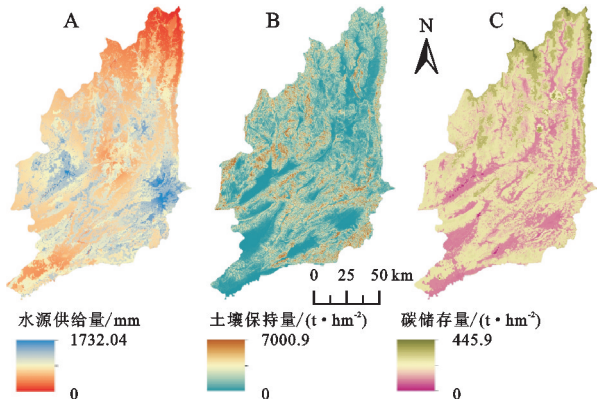


图 3 2020 年两江流域生态系统服务空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of ecosystem services in Ruili-Daying River Basin in 2020

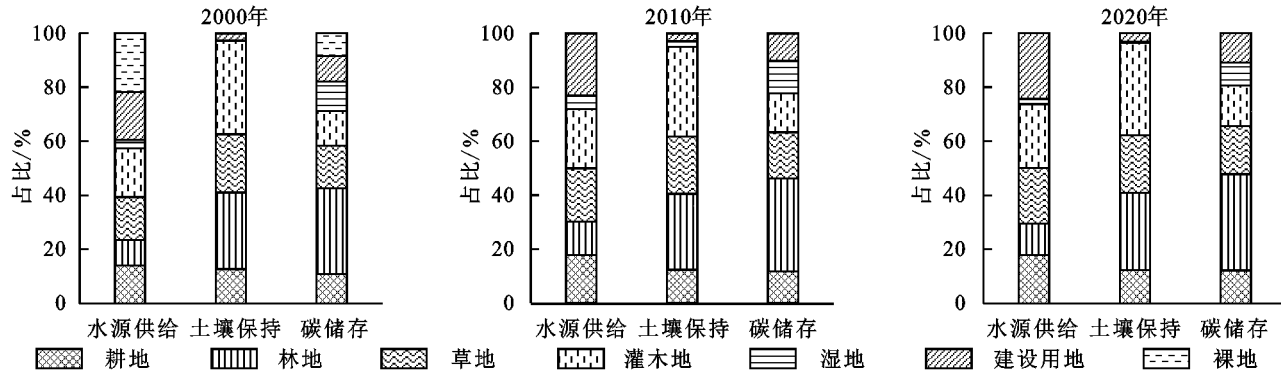


图 4 单位面积下不同土地利用类型在生态系统服务中的占比
Fig. 4 Proportion of different land use types in ecosystem services per unit area

通过统计分析两江流域 2000—2020 年不同土地利用类型的生态系统服务间权衡/协同关系(图 6)特征发

现,在2000年存在裸地时,大部分裸地的生态系统服务均呈强权衡关系。草地和灌木地中高协同与强权衡比例变化不大,但低协同占比逐步下降,反之弱权衡占比逐步提升,其中灌木地的低协同占比下降尤为显著。2000年建设用地的低协同关系比例稍高于强权衡,2010年、2020年间,几乎所有的建设用地都被强权衡关系所覆盖。总的来说,不同生态系统服务类型之间的抑制作用加强,但生态系统服务整体水平上升。耕地、林地、湿地和水体在整个研究时段内的生态系统服务间权衡/协同关系始终变化不大,以低协同和强权衡为主,其中耕地、湿地与水体的强权衡占比在2020年略有上升,但低协同所占比例始终高达70%上下,表明该地类中3

种服务均处于低水平,亟需引起重视。

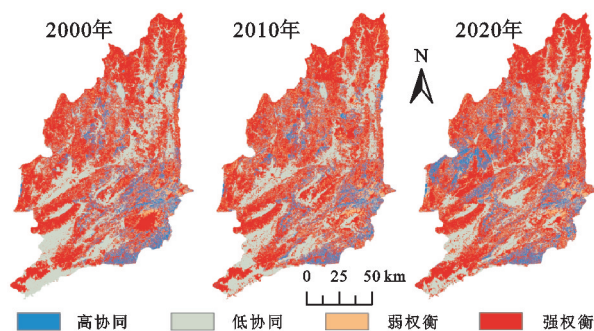


图5 两江流域生态系统服务权衡/协同空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecosystem service trade-offs/synergies in Ruili-Daying River Basin

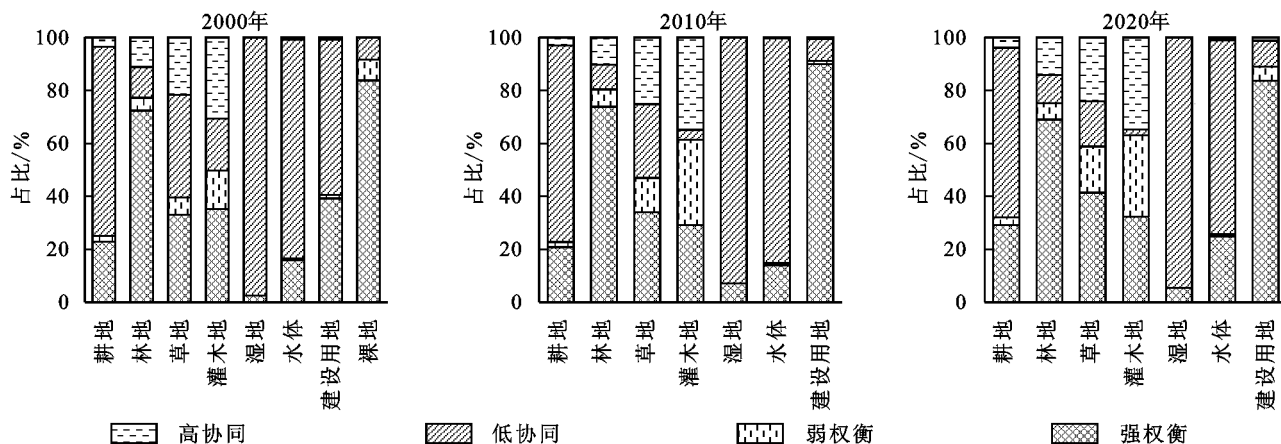


图6 两江流域各土地利用类型中生态系统服务权衡/协同占比

Fig. 6 Proportion of ecosystem service trade-off/synergies in different land use types in Ruili-Daying River Basin

3 讨论

本研究基于InVEST模型估算出2000—2020年两江流域水源供给、土壤保持和碳储存3种服务的多年平均值分别为749.60 mm, 365.78 t/hm², 137.51 t/hm²。其中,水源供给结果与戴尔阜等^[28]在横断山区的临近区域(泸水县、云龙县和永平县)研究结果较为一致。土壤保持量的结果与林世伟等^[26]在三江并流区的研究结果接近。碳储量中植被部分碳储量的估算结果与汤浩藩等^[29]对云南省德宏州的研究结果较为吻合,土壤部分的碳储量则与解宪丽等^[23]的研究相符。上述比较分析说明本研究的评估结果具有合理性,能反映两江流域生态系统服务变化的情况。

除了土地利用变化影响外,气候变化也是影响两江流域水源供给和土壤保持服务变化的重要因素。两江流域2000年、2010年和2020年的年均降水量分别为1467.4 mm, 1657.6 mm, 1454.7 mm,呈先增后减的特征,与水源供给服务变化一致。在空间分布上,降水量呈东南高、东北低的特征,与水源供给服务的空间变化状况相符。戴尔阜等^[28]认为以降水量和蒸散量为主气候类因子对产水量空间差异的

解释力最强。另外,研究时段内水源供给服务最大值出现的年份以及服务量峰值中心区域均与降水量分布吻合。降水侵蚀力是土壤侵蚀的重要因子,3个时段年降水侵蚀性因子 R 分别为6249.55, 7286.62, 6699.36 MJ·mm/(hm²·h·a),其时空变化和土壤保持变化基本一致。贾振宇等^[30]也发现土壤保持能力会随着降水量和高程的增加而增加。

基于空间叠置法判别生态系统服务的权衡与协同效应,可以识别多种服务间的权衡关系发生的空间位置,有助于权衡管理决策与特定空间位置相对应^[10],但是难以体现生态系统服务随时间变化而表现出来的阶段性和差异性^[31]。因此需要基于长序列数据进一步研究生态系统服务关系演变趋势和局部特征。本研究评估结果能清晰反映两河流域的生态系统服务的时空变化特征,但是结果仍存在一定的不确定性。如研究区位于中缅边境,境外气象站点数据难以获取,本文仅使用了境内站点数据难以精确刻画降水空间特征。此外,土地利用数据是评估生态系统服务的关键,基于遥感解译的土地利用产品精度需要进一步验证。最后,InVEST模型涉及许多参数设定,本研究中模型参数主要参考了模型用户手册和相

关文献,上述因素可能会影响评估结果的准确性。因此,未来需要在高精度输入数据、模型原理、参数验证等方面进一步开展研究。

4 结论

(1) 2000—2020年,两江流域耕地、林地、草地、湿地和裸地面积分别减少了123.49,101.57,33.76,0.27,5.58 km²,灌木地、水体和建设用地面积分别增加了54.98,46.18,163.52 km²。

(2) 两江流域水源供给、土壤保持和碳储存3种服务的多年平均值分别为749.60 mm,365.78 t/hm²,137.51 t/hm²。水源供给服务呈由南向北递减的态势,土壤保持和碳储存空间分布具有山地高、河谷低的特点。水源供给和土壤保持呈先增后减变化,碳储量变化不明显。

(3) 不同土地利用类型提供的生态系统服务具有差异性,单位面积下建设用地、灌木地和林地分别提供了最高的水源供给量、土壤保持量和碳储存量。

(4) 2000—2020年两江流域3种生态系统服务以权衡关系为主,且权衡比例逐渐升高,由59.31%上升至62.89%,覆盖了绝大部分的林地和建设用地。低协同区域所占面积比例在20 a间下降了5.78%;强/弱权衡、高协同区域面积比例分别提升了0.79%,2.79%,2.2%;在整个研究时段内,流域内生态系统服务权衡程度有所加强,但服务整体水平呈上升趋势。

参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [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] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: A Framework for Assessment[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J].地球科学进展,2015,30(11):1250-1259.
Dai E F, Wang X L, Zhu J J, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J]. Advances in Earth Science, 2015,30(11):1250-1259.
- [5] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
Qian C Y, Gong J, Zhang J X, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):868-879.
- [6] 王鹏涛,张立伟,李英杰,等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].地理学报,2017,72(11):2064-2078.
Wang P T, Zhang L W, Li Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(11):2064-2078.
- [7] 汪晓珍,吴建召,吴普侠,等.2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J].水土保持学报,2021,35(4):114-121,128.
Wang X Z, Wu J Z, Wu P X, et al. Spatial and temporal distribution and trade-off of water conservation, soil conservation and NPP services in the ecosystems of the Loess Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):114-121,128.
- [8] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009,7(1):4-11.
- [9] 于媛,韩玲,李明玉,等.哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J].水土保持研究,2021,28(2):293-300.
Yu Y, Han L, Li M Y, et al. Study on the spatial-temporal characteristics of ecosystem services and tradeoffs/synergies in Ha-Chang urban agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):293-300.
- [10] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].地理学报,2020,75(5):975-988.
Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):975-988.
- [11] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(1):80-88.
Wang X M, Pan P P, Wang X X, et al. Research on ecosystem service trade off/synergy relationship in Hebei Province based on land use[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(1):80-88.
- [12] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.
Peng J, Hu X X, Zhao M Y, et al. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. Acta Geographica Sinica, 2017,72(6):960-973.

- [13] Budyko M I. Climate and Life[M]. New York, USA: Academic Press, 1974.
- [14] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3):701-708.
- [15] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
Zhou W Z. A Study on Available Water Capacity of Main Soil Types in China Based on Geographic Information System[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [17] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, et al. InVEST Tip User's Guide[M]. Palo Alto, USA: the Natural Capital Project, 2014.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning[M]. Washington D C: Agricultural Handbook, 1978.
- [19] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6):705-711.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6):705-711.
- [20] Wischmeier W H, Johnson C B. A soil erodibility nomograph for farmland and conservation sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5):189-193.
- [21] 彭建, 李丹丹, 张玉清. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析: 以云南省丽江市为例[J]. 山地学报, 2007, 25(5):548-556.
Peng J, Li D D, Zhang Y Q. Analysis of spatial characteristics of soil erosion in mountain areas of north-western Yunnan Based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(5):548-556.
- [22] Duan X W, Rong L, Hu J M, et al. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, southwest China: Spatial variations and environmental controls[J]. Journal of Soil & Sediments, 2014, 14(10):1643-1658.
- [23] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1):35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):35-43.
- [24] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):687-699.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5):687-699.
- [25] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(1):72-80.
Li K R, Wang S Q, CAO M K. Carbon storage of vegetation and soil in China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2003, 33(1):72-80.
- [26] 林世伟, 武瑞东. “三江并流”区生态系统土壤保持服务的空间分布特征[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2015, 37(2):295-302.
Lin S W, Wu R D. The spatial pattern of soil retention ecosystem service in the Three Parallel Rivers Region [J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2015, 37(2):295-302.
- [27] 李理, 赵芳, 朱连奇, 等. 淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J]. 生态学报, 2021, 41(19):7568-7578.
Li L, Zhao F, Zhu L Q, et al. Geographical detection of ecosystem services trade-offs and their spatial variation mechanism in Qihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19):7568-7578.
- [28] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J]. 地理学报, 2020, 75(3):607-619.
Dai E F, Wang Y H. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3):607-619.
- [29] 汤浩藩, 许彦红, 艾建林. 云南省森林植被碳储量和碳密度及其空间分布格局[J]. 林业资源管理, 2019(5):37-43.
Tang H F, Xu Y H, Ai J L. Carbon storage and carbon density of forest vegetation and their spatial distribution pattern in Yunnan Province[J]. Forest Resources Management, 2019(5):37-43.
- [30] 贾振宇, 王世曦, 刘学, 等. 辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4):686-692.
Jia Z Y, Wang S X, Liu X, et al. Spatial and temporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4):686-692.
- [31] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21):7582-7595.
Wang B, Zhao J, Hu X F. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21):7582-7595.