

西藏“一江两河”流域生态系统服务变化及 权衡与协同关系研究

陈安¹, 李景吉^{1,3}, 王茂生¹, 张晗², 卞梨交¹, 黎文婷¹, 许文来^{1,3}

(1.成都理工大学 生态环境学院, 成都 610059; 2.成都理工大学 地球科学学院,
成都 610059; 3.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059)

摘要:为使环境资源得到高效配置,明晰生态系统服务间权衡关系是重要前提。以一江两河流域为对象,基于 InVEST 模型对该区 1990—2018 年的土壤保持、水源涵养和固碳服务进行动态评估,并采用相关分析法探讨了流域、县域尺度下各服务间的权衡关系。结果表明:(1) 1990—2018 年,土壤保持量和碳储量呈波动增加趋势,产水量呈减少趋势。单位面积土壤保持量、产水量和碳储量的高值区均分布在流域东部的拉萨河河谷地区。(2) 流域尺度下,2010 年水源涵养服务与固碳服务间表现出权衡关系,其余年份各服务间均呈现出协同关系;县域尺度下,各服务间关系也多为协同关系,但具有较强的空间异质性。(3) 热点制图显示,1990—2018 年 1 类区占比最大且呈增加趋势,主要地类为低植被覆盖草地;0 类和 2 类区占比增加,主要地类分别为沙地和高植被覆盖草地;3 类区占比有所减少,主要地类为高植被覆盖草地和灌木林。由此可得,研究区 3 种生态系统服务具有较强的时空异质性,各服务间以协同关系为主,且随时空变化而发生着强弱变化。

关键词:InVEST 模型;生态系统服务;土壤保持;水源涵养;固碳

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0313-07

Research for Change of Ecosystem Service and the Tradeoff-Synergy Relation of the YLN Basin in the Tibet Autonomous Region

CHEN An¹, LI Jingji^{1,3}, WANG Maosheng¹, ZHANG Han², BIAN Lijiao¹, LI Wenting¹, XU Wenlai^{1,3}

(1.College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2.College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3.State Key Laboratory of
Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract:For the effective allocation of environmental resources, clarifying the tradeoff relations among the ecosystem services is the important premise. The YLN Basin (the Basin of Yarlung Tsangpo River, Lhasa River, and Nianchu River) is the research case. Based on InVEST model, this regional soil conservation, water conservation, and carbon storage between 1990 and 2018 were evaluated dynamically. This paper also adopted the other related analysis to discuss the tradeoff relations among the different services on the scales of basin and county respectively. The results show that: (1) from 1990 to 2018, the soil conservation and the carbon storage showed a fluctuating increasing trend, water production reduced; the high values of soil conservation, water production and carbon storage in per unit area all distributed in the Lhasa River valley in the eastern basin; (2) on scale of basin, there was a trade-off nexus between water conservation service and carbon storage service in 2010, and the other services all manifested synergistic nexus in the other years; on the scale of county, the relations of services mainly were occupied by synergistic nexus, nonetheless it possessed relatively intensive spatial heterogeneity; (3) the hotspot map illustrated that category 1 had largest proportion and it was increasing between 1990 and 2018, the main land type was low vegetation covered meadow; the proportions of the categories of 0 and 2 increased, the main land types were sandy land and high

收稿日期:2021-01-19

修回日期:2021-02-19

资助项目:国家重点研发项目“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0307)

第一作者:陈安(1995—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为生态环境监测与评价。E-mail:350583076@qq.com

通信作者:李景吉(1983—),男,江苏徐州人,博士,讲师,主要从事植物多样性与生态保护研究。E-mail:lijingji2014@cdut.edu.cn

vegetation covered meadow; the proportion of category 3 reduced, the main land types were high vegetation covered meadow and shrubbery. Therefore, the 3 kinds of ecosystematic services have the relatively intensive spatial heterogeneity, and the synergistic nexus is the major one among the services that is alterable following the spatiotemporal change showing different degrees.

Keywords: InVEST model; ecosystem services; soil conservation; water conservation; carbon storage

生态系统服务是指人类从自然或人工生态系统中获得的全部惠益,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务等^[1]。随着联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA, 2005)项目实施,生态系统服务和区域发展之间的关系研究已成为生态学研究热点问题之一^[2]。生态系统服务是维持人类社会发展的基础,其空间格局存在多样性、非均衡性,加之人类对生态系统服务管理和使用也具有选择性,使得各生态系统服务间有着复杂的相互关系,呈现出相互增益的协同或此消彼长的权衡^[3]。研究人类活动影响下的生态系统服务间权衡协同关系,对推进生态文明建设和实现区域可持续发展具有重要意义。

近年来,国内外学者分别从不同研究尺度、方法等方面对生态系统服务间的权衡协同关系开展研究。在研究权衡协同关系的方法上,主要采用了统计学、空间分析、生态系统流动和情景模拟等方法^[4]。包蕊等^[5]采用多目标线性规划模型,优化了甲积峪流域生态系统服务间的权衡协同关系研究;陈登帅等^[6]采用情景模拟法,预测了渭河流域 2050 年的土地利用格局,并且进行最优生态系统服务间的权衡协同关系研究;尹礼唱等^[7]采用相关系数法,量化研究了“两屏三带”区域生态系统服务间权衡协同关系的时空分布。另外,诸多学者也从不同时空尺度下研究了生态系统服务之间的相互作用关系。Schroback^[8]和 Dymond^[9]等指出,在某些区域实施人工造林会提高水土保持服务和固碳服务的水平,但也会降低区域的水源涵养服务;Zhou 等^[10]利用生产性边界(Production Possibility Frontier, PPF),深入研究了固碳、农业生产和水土保持 3 种服务之间的相互作用机制;Howe 等^[11]通过研究大量生态系统服务关系案例,发现权衡协同关系中的权衡关系是协同关系 3 倍左右。可见,基于不同研究尺度下,生态系统服务间权衡协同关系不但存在时空差异,而且各服务间的相互作用机制也较为复杂。

一江两河流域地处青藏高原腹地,其中一江是指雅鲁藏布江,两河分别指雅鲁藏布江的一级支流年楚河和拉萨河。该流域面积仅占西藏的 5.48%,但人口约占总人口的 1/3,经济总量也远超西藏其他区域^[12]。目前,国内学者对青藏高原重大流域的研究多聚焦于生态系

统服务功能分类、评估与制图,权衡与协同关系等。例如,郑德凤等^[13]利用价值模型研究了三江源地区生态系统服务的价值变化及其权衡与协同关系;连喜红等^[14]采用 InVEST 模型和全局莫兰指数研究了青海湖流域生态系统服务的空间变化特征和各服务间的相关关系;卢慧婷等^[15]采用 InVEST 模型揭示了拉萨河流域的生态系统质量变化及其对生态系统服务的影响。然而,国内外对一江两河流域生态系统服务评估的相关研究鲜有报道,各生态系统服务之间的权衡与协同关系不清楚。因此,本文基于 InVEST 模型,并结合一江两河流域的地域特征,定量研究 1990—2018 年流域生态系统的土壤保持服务、水源涵养服务和固碳服务的时空变化特征及其权衡与协同关系,以期流域各县推进生态文明建设、实行更具针对性的生态恢复治理措施提供科学依据。

1 研究区概况

一江两河流域位于雅鲁藏布江中游,行政区划上包括拉萨市等 18 个市县(图 1),地理范围为 87°40′—92°37′E,28°60′—30°30′N,面积为 6.67 万 km²。流域位于高原温带季风半干旱气候区,年均温度 5~10℃,年累计降雨量 200~500 mm,年均相对湿度 40%~50%^[16]。区内地势差异大、降雨季节性强,主要集中在 5—9 月,是西藏重点的生态脆弱区和治理区^[17]。全区植被类型以高山草甸为主,土壤类型以沙壤土和轻壤土为主,土壤有机质含量较低。自 20 世纪 80 年代,一江两河流域开始实施大规模治沙造林工程,河谷两岸的阶地、河滩地和山地缓坡上分布大量人工林,树种以北京杨(*Populus × beijingensis* W. Y. Hsu)和旱柳(*Salix matsudana*)为主。

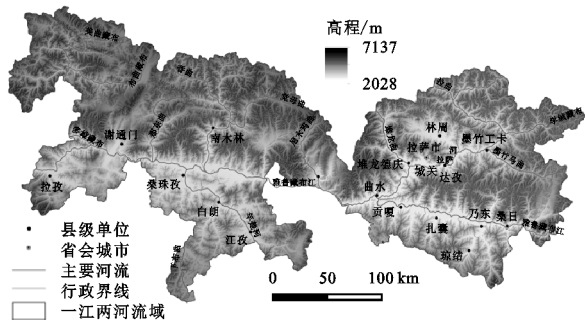


图 1 一江两河流域位置

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象数据来自中国气象数据共享网 (<http://data.cma.cn>),选取一江两河流域内及周围 15 个气象站点的气温、降水、风速、湿度和日照时数等数据;陆地生态系统类型数据来自中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn>),该数据基于 1:10 万土地利用数据,将各土地覆被类型分类合并成农田、森林、草地、水体与湿地、聚落、荒漠生态系统类型,空间分辨率为 30 m;土壤数据来源于世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database) 的中国土壤数据集 (v1.2) (westdc.westgis.ac.cn),分辨率为 1 km;地形数据来自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤保持 本研究采用 InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs) 模型 3.8.2 版本进行生态系统服务分析与评价。土壤保持服务利用 InVEST 模型中 Sediment Delivery Ratio 模块进行计算,该模块是在广为应用的土壤流失方程 (USLE) 的基础上,考虑了地块本身对上游沉积物的拦截能力,使计算结果更为准确。计算公式如下:

$$RKLS=R \times K \times LS \tag{1}$$

$$USLE=R \times K \times LS \times C \times P \tag{2}$$

$$SD=RKLS-USLE \tag{3}$$

式中:RKLS 为特定地貌及气候条件下研究区的潜在土壤侵蚀量(t);USLE 是考虑了植被拦截作用、实施管理工程措施后的实际土壤侵蚀量(t);SD 为土壤保持量(t);R 为降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h·a)],基于 Wischmeier 等^[18]月尺度计算公式,利用克里金法插值得到;K 为土壤可蚀性[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)],利用 EPIC 模型^[19]计算得到;LS 为坡长坡度因子;C, P 为植被覆盖因子和土壤保持措施因子,参考前人^[20-21]研究结果得到。

2.2.2 水源涵养 水源涵养服务通过 InVEST 模型中 Water Yield 模块进行计算。该模块是基于水量平衡原理,考虑研究区不同植被、地貌和气候条件等因素,利用降水量减去实际蒸发量估算出地区产水量。相关公式如下:

$$Y_x=\left(1-\frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \tag{4}$$

$$\frac{AET_x}{P_x}=\frac{1+w_xR_x}{1+w_xR_x+\frac{1}{R_x}} \tag{5}$$

$$w_x=Z \times \frac{AWC_x}{P_x} \tag{6}$$

$$R_x=\frac{K_x \times ET_0}{P_x} \tag{7}$$

式中:Y_x为生态系统类型栅格 x 的年产水量(mm);AET_x为栅格 x 的年实际蒸散发量(mm);P_x为栅格 x 的年降水量(mm);PET_x为栅格 x 的潜在蒸散量(mm);K_x为栅格 x 上特定植被的蒸散发系数,由前人研究^[22-23]及联合国粮农组织 (FAO) 的作物蒸发系数指南综合确定;ET₀为参考蒸散量,由 Modified-Hargreaves^[24]公式计算得到;AWC_x为植被可利用含水量(mm),依据周文佐等^[25]确定的拟合模型计算;w_x为非物理参数;Z 为经验参数。

2.2.3 固碳 固碳服务采用 InVEST 模型中 Carbon 模块进行计算。该模块以各生态系统类型或植被类型为评价单元,通过输入对应的碳密度参数计算地区生态系统碳储量。本研究考虑 4 个基本碳库(表 1),即地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳和枯落物有机碳。计算公式如下:

$$C=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \tag{8}$$

式中:C 为总碳储量[t/(hm²·a)];C_{above}为地上生物碳储量[t/(hm²·a)];C_{below}为地下生物碳储量[t/(hm²·a)];C_{soil}为土壤有机碳储量[t/(hm²·a)];C_{dead}为枯落物碳储量[t/(hm²·a)]。碳密度参数依据文献^[26-29]得到。

表 1 一江两河流域各生态系统的碳密度

类型	t/hm ²			
	C _{above}	C _{below}	C _{soil}	C _{dead}
农田生态系统	5.7	80.7	74.9	1
森林生态系统	42.4	120	76.8	67.5
草地生态系统	35.3	26.5	71	2.2
水体与湿地生态系统	10	8	68.5	0
聚落生态系统	1.9	4.8	27.1	1
荒地生态系统	4	20	8.8	0

2.2.4 生态系统权衡与协同关系 本研究采用相关分析法,分别从流域尺度和县域尺度下探讨生态系统服务之间的权衡与协同关系,如果两类生态系统服务间相关系数为正,说明二者之间呈协同关系,如果相关系数为负,说明两者之间呈权衡关系。具体做法为:流域尺度下以 1990—2018 年各生态系统服务栅格数据为基础,利用 ArcGIS 10.2 软件设置分区采样点间隔距离为 10 km,然后将采样点导出到 SPSS 22.0 软件中进行相关分析;县域尺度下以 2000 年和 2010 年各生态系统服务栅格数据为基础,设置分区采样点间隔距离为 3 km,同理进行后续的分析。

通过对生态系统服务热点地区进行识别,可以更

好地分析不同地域生态系统服务供给能力的强弱,从而对流域进行划分,对生态系统服务和人类活动提出更具针对性的对策及建议。例如,草地既可以提供碳储存能力,又可以提供土壤保持能力,但是其提供的这两种服务能力大小不同,也就导致其在单位面积上提供服务能力的不同。本研究将土壤保持服务、水源涵养服务和固碳服务超过各自平均值的地区进行叠加分析后得到一江两河流域多重生态系统服务的热点地区(表 2)。

表 2 热点地区分类和定义

热点地区分类	定义
0 类服务区	某一栅格单元内 3 种生态系统服务值均未超过其平均值的区域
1 类服务区	某一栅格单元内只有 1 种生态系统服务值超过其平均值的区域
2 类服务区	某一栅格单元内有 2 种生态系统服务值超过其平均值的区域
3 类服务区	某一栅格单元内 3 种生态系统服务值都超过其平均值的区域

3 结果与分析

3.1 生态系统结构时空变化特征

从 1990—2018 年一江两河流域土地覆被类型分布(附图 1)来看,流域西北部有大片草地变为裸土地或裸岩地,主要分布在谢通门和南木林二县,但在南

木林县香曲流域、谢通门县那东曲流域、雅鲁藏布江拉孜段和日喀则段的林地面积增加。流域东部墨竹工卡县有部分高植被覆盖草地退化为低植被覆盖草地,达孜区、贡嘎县、扎囊县、乃东区和桑日县疏林地和灌木林面积明显增加。近 28 a 流域整体的生态系统结构已经出现重大变化:相比 1990 年,2018 年流域的农田面积减少 2.09%,森林面积增加 476.67%,草地面积减少 31.64%,水体与湿地面积增加 28.29%,聚落面积增加 108.75%,荒漠面积增加 87.46%。

3.2 生态系统服务时空变化特征

3.2.1 土壤保持服务 1990—2018 年一江两河流域生态系统土壤保持量空间分布格局变化较小,仅在南木林县香曲流域和谢通门县那东曲流域的土壤保持量出现明显增加现象(图 2)。土壤保持量较高区域主要分布在拉萨河及支流的河谷两侧,该区域林地和草地覆盖率相对较大,并呈相间分布,土壤保持能力强;较低区域分布在雅鲁藏布江上游和年楚河两侧部分地区,该地区地势相对低平,农田、建设用地等单一地类分布较多,土壤保持能力弱。统计结果显示(表 3),流域土壤保持量总体呈上升趋势,年平均值由 1990 年的 106.65 t/(hm²·a) 提高到 2018 年的 155.03 t/(hm²·a),增幅为 45.36%。

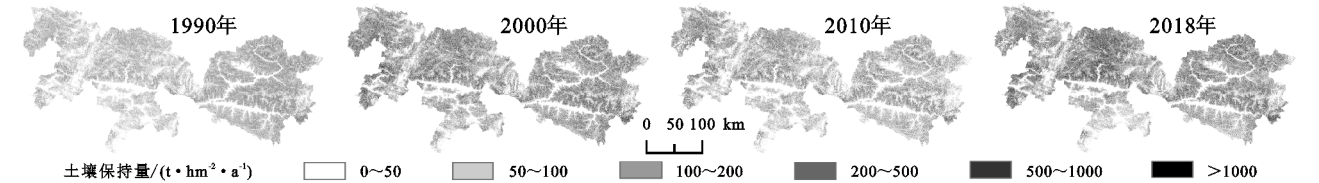


图 2 1990—2018 年一江两河流域土壤保持量空间分布

表 3 1990—2018 年一江两河流域各项生态系统单位面积值

年份	单位面积土壤保持量/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积产水量/ (mm·m ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积碳储量/ (t·hm ⁻²)
1990	106.65	91.32	129.81
2000	146.10	118.29	129.88
2010	100.75	53.09	144.24
2018	155.03	67.99	143.95

3.2.2 水源涵养服务 一江两河流域的产水量总体呈下降趋势,年平均值由 1990 年的 91.32 mm/(m²·a) 下降到 2018 年的 67.99 mm/(m²·a),降幅为 25.55%(表 3)。其中 1990—2000 年和 2010—2018 年的产水量为增长趋势,2000—2010 年为减少趋势。产水量的高值区域主要分布在流域东部的拉萨河流域,低值区域分布在年楚河流域及雅鲁藏布江拉孜段(图 3)。由于一江两河流域气候干燥、光照强烈,因此根据模型计算出的产水量与各生态系统类型的蒸发能力密切相关。流域东部林地的产水量普遍较低,裸地的产水量较高,这是因为林地蒸发作用比裸地强,且林地主要分布在降水相对偏少的拉萨河下游地区,而

裸地部分位于降水量偏多的拉萨河上游地区。整体上研究区的各子流域产水量基本受降水控制,降水量高的地方,产水量也高;其次受各生态系统类型的植被覆盖度和蒸发量的影响。

3.2.3 固碳服务 一江两河流域碳储量在逐年上升,年平均值由 1990 年的 129.81 t/hm² 上升到 2018 年的 143.95 t/hm²,增幅为 10.9%(表 3)。碳储量高值区主要分布在拉萨河流域的河谷地带和雅鲁藏布江两侧沿岸(图 4),该地区的生态系统类型以森林和草地为主,生物多样性丰富,固碳服务水平高。碳储量低值区多出现在流域西北部南木林县和谢通门县的觉母曲流域和布曲藏布流域,该地区裸地面积较大,且在 1990 年后出现大量草地退化成裸地现象,导致草地生态系统的固碳能力下降,区域生物多样性降低,有机物积累减少。

3.3 生态系统服务间权衡与协同关系

3.3.1 相关性分析 对整个一江两河流域土壤保持服务、水源涵养服务与固碳服务 3 个生态系统服务进行两两之间的相关性分析,结果见表 4。土壤保持服务

与水源涵养服务、土壤保持服务与固碳服务的相关系数显著为正($p<0.05$),并且均呈波动减小趋势,说明在流域尺度下这两对生态系统服务之间存在显著的协同关系,但协同关系不断减弱。此外,水源涵养服

务与固碳服务之间的相关系数在 2010 年表现出显著负相关关系($p<0.01$),其余年份均为显著正相关关系($p<0.01$),这表明一江两河流域水源涵养服务与固碳服务的权衡协同关系存在时空差异性。

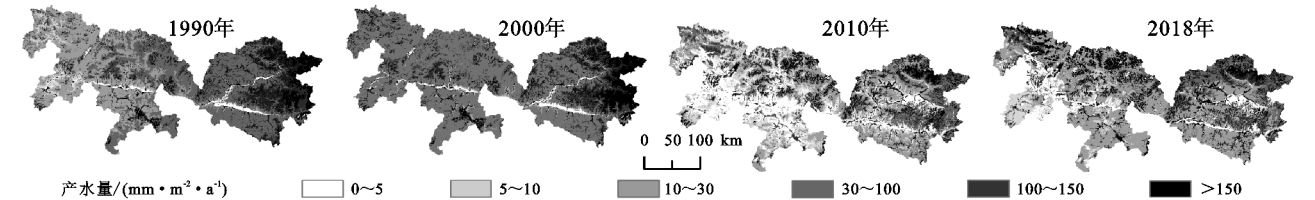


图 3 1990—2018 年一江两河流域产水量空间分布

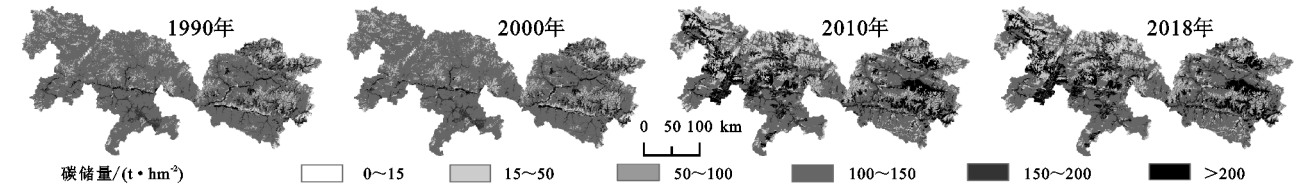


图 4 1990—2018 年一江两河流域碳储量空间分布

表 4 1990—2018 年一江两河流域生态系统间的相关系数

年份	水源涵养与 固碳	水源涵养与 土壤保持	固碳与 土壤保持
1990	0.15**	0.29**	0.25**
2000	0.13**	0.28**	0.15**
2010	−0.29**	0.11*	0.17**
2018	0.55**	0.15**	0.14**

注: * 表示在 0.05 水平上显著, ** 表示在 0.01 水平上显著, 下同。

在县域尺度下对 3 种生态系统服务进行相关分析,结果见表 5—6。2000 年一江两河流域各区县 3 种生态系统服务间相关系数基本为正,表明各服务间

的主导关系为协同关系,其中土壤保持服务与水源涵养服务协同作用程度最高(18 个区县中 15 个通过 0.05 水平的显著性检验),以墨竹工卡县和拉孜县最为显著。但 2010 年各区县土壤保持服务和水源涵养服务的相关系数普遍减小,协同关系减弱,这与上文得出的在流域尺度下协同关系减弱的结果相一致,并在谢通门县和林周县两种服务表现出较强的协同关系。另外,2000 年和 2010 年各区县水源涵养服务与固碳服务之间的权衡与协同关系基本相反,二者关系在南木林县和尼木县的变化最大。

表 5 2000 年一江两河流域县域尺度
生态系统服务间的相关系数

区县	水源涵养与 固碳	水源涵养与 土壤保持	固碳与 土壤保持
堆龙德庆区	0.20**	0.23**	0.21**
贡嘎县	0.17*	0.36**	0.08
江孜县	0.48**	0.22**	0.25**
城关区	−0.15*	0.28*	0.01
林周县	0.07	0.21**	0.24**
墨竹工卡县	0.40**	0.41**	0.37**
乃东区	0.05	0.26**	0.38**
南木林县	0.26**	0.14	0.10
尼木县	0.24**	0.08	0.16
琼结县	0.44**	0.31**	0.08
曲水县	0.01	0.34**	0.10
桑珠孜区	0.05	0.37**	0.07
桑日县	0.25*	0.18*	0.13
谢通门县	0.12	0.26**	−0.09
扎囊县	0.03	0.22*	0.05
白朗县	0.71**	0.33**	0.31**
达孜区	0.04	0.16	0.04
拉孜县	−0.18*	0.41**	0.04

表 6 2010 年一江两河流域县域尺度
生态系统服务间的相关系数

区县	水源涵养与 固碳	水源涵养与 土壤保持	固碳与 土壤保持
堆龙德庆区	−0.15	0.10	0.23**
贡嘎县	−0.03	0.08	0.15
江孜县	−0.16	−0.05	0.23**
城关区	−0.65**	0.10	0.07
林周县	−0.30**	0.25**	0.27**
墨竹工卡县	−0.15	0.21*	0.19*
乃东区	0.20	0.16	0.19*
南木林县	−0.46**	0.18	0.07
尼木县	−0.22**	0.20**	−0.02
琼结县	−0.12	0.14	0.04
曲水县	−0.30**	0.05	0.14
桑珠孜区	−0.30**	0.18	0.13
桑日县	−0.02	0.11	0.42**
谢通门县	−0.46**	0.31**	−0.14
扎囊县	0.02	0.11	0.26**
白朗县	0.04	0.11	0.22*
达孜区	−0.54**	0.05	0.15
拉孜县	−0.43**	0.25*	−0.01

3.3.2 生态系统服务热点分析 对附图 2 中各类生

态生态系统服务热点地区进行统计可知,1990—2018 年,

0 类服务区主要分布在雅鲁藏布江和拉萨河河谷两

侧的沙地和盐碱地附近。由此可见,沙地和盐碱地的

总体生态系统服务水平较低,并且0类服务区在雅鲁藏布江上游地区有逐年增加趋势,所占比例由1990年的1.45%增加到2018年的3.44%。1类服务区面积占比由52.13%增加到52.87%,期间呈先减后增的波动特征,该类型的生态系统主要为低植被覆盖的草地,产水量高而土壤保持量和碳储量低。2类服务区主要分布在各子流域部分林地和高植被覆盖草地周边,两种生态系统服务多为土壤保持服务和固碳服务。2类服务区面积由37.63%增加到39.48%,主要增加区域为南木林县的香曲流域。3类服务区的面积占比由8.79%逐年减少至4.22%,主要分布在流域的高植被覆盖草地和灌木林区。3类服务区的时空变化特征显著,1990—2000年3类服务区主要集中于流域东部的高植被覆盖草地地区;但在2000年后,流域东部大部分高植被覆盖草地退化为中植被覆盖草地,而且随着雅鲁藏布江上、下游两侧及拉萨河河谷地带的灌木林增多,3类服务区开始出现向该区域转移现象,以墨竹工卡县、谢通门县、南木林县、扎囊县和乃东区几个重点治沙造林县最明显。

4 讨论与结论

4.1 讨论

受气候变化和人类活动影响,1990—2018年一江两河流域生态系统结构已经出现重大变化,这直接导致其服务水平发生改变。本研究基于3种生态系统服务计算模型,得到一江两河流域生态系统土壤保持服务和固碳服务水平整体上升、水源涵养服务整体下降的结果。卢慧婷等^[15]的研究表明,1990—2015年拉萨河流域由于灌木、草原等NDVI的上升,土壤保持量和碳储量增加,而产水量降低;Wang等^[30]的研究指出,在干旱、半干旱地区实施造林不但没有增加降雨量,而且还导致地表植被蒸发作用加强,大量水资源被浪费,区域产水量下降。以上成果与研究结果基本吻合。一江两河流域属高原温带季风半干旱气候,近28a来拉萨河等子流域河谷两岸的阶地、河滩地和山地缓坡上增加了大量人工灌木林,全区土壤保持量和碳储量增加区域均与林地增加区域保持高度一致,而作为提供水源涵养服务较高的草地发生不同程度的退化,造成了流域产水量整体下降。但本文与黄麟等^[31]得到的西藏水源涵养服务1990—2010年呈上升趋势的结果有所差异,这可能是研究区范围、分析尺度及生态系统服务测算方法不同造成的。

研究一江两河流域多重生态系统服务的权衡协同关系发现,各生态系统服务间的权衡协同关系存在空间异质性,这是由生态系统服务间复杂相互作用和

共同的驱动因素(地貌、气候条件或人为因素造成的土地覆被变化)引起的。1990—2018年水源涵养服务与土壤保持服务、水源涵养服务与固碳服务的相关系数波动减小,协同作用程度下降,一方面这是由于流域气候变化而导致生态系统服务水平发生改变造成的,另一方面与人类活动的影响密切相关。近28a来一江两河流域城镇化进程加快、基础设施扩建以及不合理的旅游开发造成草地等植被面积呈减少趋势^[32],各生态系统服务水平逐年下降,生态系统服务间权衡或协同关系受到影响。但随着一江两河流域治沙造林工程实施,造林区的土壤保持服务和固碳服务协同关系得到增强。另外,水源涵养服务与固碳服务之间的相关系数在2010年表现出显著负相关,其余年份均呈显著正相关,这是由于流域内森林面积的增加提高了生态系统的固碳服务水平,同时也使部分林区水汽凝结成雨,提高生态系统的水源涵养服务,两种服务之间表现为协同关系。但是,2010年一江两河流域的降雨量少、地表蒸发量增大^[33-34],流域内植被蒸腾作用加强导致其产水量普遍降低,而这些植被又对流域生态系统固碳服务贡献较大,所以该年水源涵养服务与固碳服务表现出权衡关系。

由于一江两河流域各区县的生态系统结构和自然资源禀赋存在较大差异,因此本文计算出县域尺度下各生态系统服务数值上的相关系数普遍偏低。县域尺度下各生态系统服务间权衡协同关系与流域尺度下的不完全一致,表明流域尺度的权衡协同关系不代表次一级尺度下也存在相同关系,生态系统服务间权衡协同关系具有尺度效应。此外,本文得出森林和草地相间分布地区土壤保持量的数值相对较高,而单一生态系统类型聚集的农田或草地数值偏低,表明不同生态系统对各生态系统服务水平可能存在组合效应。

生态系统服务分为多种类型,文中仅分析了一江两河流域的3种调节服务,未来可对其他生态系统服务进行评估,为区域生态环境治理和管理提供更全面的决策依据。科学问题方面,下一步将探讨一江两河流域典型生态工程区的多种生态系统服务权衡协同关系,深入研究不同生态修复措施带来的多重生态效益。

4.2 结论

(1) 1990—2018年,流域单位面积土壤保持量、碳储量呈波动增加趋势,产水量呈减少趋势;各生态系统服务的高值区集中分布于流域东部的拉萨河河谷地区,该区生态系统类型以森林和草地为主。

(2) 流域尺度下,2010年流域生态系统的水源涵养服务与固碳服务呈权衡关系,其余年份各生态系统服务间呈协同关系;县域尺度下,各年份生态系统

服务间关系也多为协同关系,并且具有较强的空间异质性和尺度依赖性。

(3) 热点制图显示,流域 0 类、1 类和 2 类服务区面积占比增加,3 类服务区面积占比减小,3 类服务区出现雅鲁藏布江下游向上游转移现象。

参考文献:

- [1] Raymond C M, Singh G G, Benessaiah K, et al. Ecosystem services and beyond: using multiple metaphors to understand human-environment relationships [J]. *Bioscience*, 2013, 63 (7):536-546.
- [2] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].*地球科学进展*,2009,24(6):571-576.
- [3] Yang G, Ge Y, Xue H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2015,136:110-121.
- [4] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].*地理研究*,2016,35(6):1005-1016.
- [5] 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.
- [6] 陈登帅,李晶,杨晓楠,等.渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J].*生态学报*,2018,38(9):3260-3271.
- [7] 尹礼唱,王晓峰,张琨,等.国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J].*地理研究*,2019,38(9):2162-2172.
- [8] Schrobback P, Adamson D, Quiggin J. Turning water into carbon: Carbon sequestration and water flow in the Murray-Darling Basin[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2010,49(1):23-45.
- [9] Dymond J R, Ausseil A G, Djanibekov N, et al. How attractive are short-term CDM forestations in arid regions: The case of irrigated cropland in Uzbekistan [J]. *Forest Policy and Economics*, 2012,21:108-117.
- [10] Zhou Z X, Li Jing, Guo Z Z, et al. Trade-offs between carbon, water, soil and food in Guanzhong-Tianshui economic region from remotely sensed data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017,58:145-156.
- [11] 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 Environment Change*, 2014,28:263-275.
- [12] 杜军,胡军,尼玛吉,等.1981—2017 年西藏“一江两河”流域 5 cm 地温及其界限温度时空变化特征[J].*地理学报*,2019,74(9):1821-1834.
- [13] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J].*地理研究*,2020,39 (1):64-78.
- [14] 连喜红,祁元,王宏伟,等.人类活动影响下的青海湖流域生态系统服务空间格局[J].*冰川冻土*,2019,41(5): 1254-1263.
- [15] 卢慧婷,黄琼中,朱捷缘,等.拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响[J].*生态学报*,2018,38(24):8911-8918.
- [16] 张戈丽,欧阳华,周才平,等.近 50 年来气候变化对西藏“一江两河”地区农业气候热量资源的影响[J].*资源科学*,2010,32(10):1943-1954.
- [17] 王聪,伍星,傅伯杰,等.重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J].*生态学报*,2019,39(20):7333-7343.
- [18] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1958,39(2):285-291.
- [19] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983,38 (5): 381-383.
- [20] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models [J]. *the Science of the Total Environment*, 2018,635:673-686.
- [21] Lu Q S, Xu B, Liang F Y, et al. Influences of the Grain-for-Green project on grain security in southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2013,34(11):616-622.
- [22] 欧阳志云,王如松.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].*应用生态学报*,1999,10(5):635-640.
- [23] 杨蕾.基于 In VEST 模型的三江源主要生态系统服务权衡与协同研究[D].上海:上海师范大学,2020.
- [24] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].*生态学报*, 2013,33(3):726-736.
- [25] 周文佐,刘高焕,潘剑君.土壤有效含水量的经验估算研究:以东北黑土为例[J].*干旱区资源与环境*,2003,17 (4):88-95.
- [26] Li J, Gong J, Guldman J M, et al. Carbon dynamics in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1990 to 2030 using landsat land use/cover change data[J]. *Remote Sensing*, 2020,12(3):528-528
- [27] Zhao S, Zhu C, Zhou D, et al. Organic carbon storage in China's urban areas[J]. *PLoS One*, 2013,8(8). DOI:10.1371/journal.pone.0071975.
- [28] 范宇.西藏土壤有机碳库及其空间分布特征研究[D].成都:四川农业大学,2006.
- [29] 赵忠贺,徐增让,成升魁,等.西藏生态系统碳蓄积动态的土地利用/覆被变化归因分析[J].*自然资源学报*, 2016,31(5):755-766.

[20] 魏璐瑶,陆玉麒.“一带一路”背景下全球气候变化的响应机制研究[J].生态经济,2019,35(12):153-158.

[21] 吴成启,唐登勇.近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J].水土保持研究,2017,24(6):262-266,272.

[22] 何金海,詹丰兴,祁莉,等.全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估[J].大气科学,2016,40(1):33-45.

[23] 张秀年,严华生,郭世昌.“全球变暖”背景下的全球气温时空变化特征[J].热带气象学报,2004,20(5):561-570.

[24] Ge Q S, Zhang X Z, Hao Z X, et al. Rates of temperature change in China during the past 2000 years[J]. Science China, 2011,54(11):1627-1634.

[25] Panin G N, Solomonova I V, Vyruchalkina T Y. Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Water Resources, 2009,36(6):718-730.

[26] Kong Y, Wang C H. Responses and changes in the permafrost and snow water equivalent in the Northern Hemisphere under a scenario of 1.5℃ warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2017,8(4):235-244.

[27] 徐婷,邵华,张弛.近 32 a 中亚地区气温时空格局分析[J].干旱区地理:汉文版,2015,38(1):25-35.

[28] 吴国雄,刘屹岷,何编,等.青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J].大气科学,2018,42(3):488-504.

[29] Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 2007,448(7152):461-465.

[30] Huang X, Zhou T J, Zhang W X, et al. Northern Hemisphere land monsoon precipitation changes in the twentieth century revealed by multiple reanalysis datasets[J]. Climate Dynamics, 2019,53(11):7131-7149.

[31] Chiang J C H, Friman A R. Extratropical cooling, inter-hemispheric thermal gradients, and tropical climate change[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2012,40:383-412.

[32] Wan H, Zhang X B, Zwiers F, et al. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966—2005 to human influence[J]. Climate Dynamics, 2015,45:1713-1726.

[33] Li R L, Wang C H, Wu D. Changes in precipitation recycling over arid regions in the Northern Hemisphere[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018,131(4):489-502.

[34] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J].自然资源学报,2018,33(12):2149-2166.

[35] Liu H T, Zhang X J, Li X D, et al. Climatic characteristics of temperature and precipitation in Hetian River Basin during 1954—2007[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009,4:26-30.

[36] 邱雅惠.中国区域气候多尺度突变特征及成因分析[D].南京:南京师范大学,2019.

[37] 马晓波,胡泽勇.青藏高原 40 年来降水变化趋势及突变的分析[J].中国沙漠,2005,25(1):139-141.



(上接第 312 页)

[30] 刘洋,于恩涛,杨建军,等.西北干旱区 1960—2019 年实际蒸散发时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(6):75-80,89.

[31] 龙爱华,徐忠民,张志强.虚拟水理论方法与西北四省(区)虚拟水实证研究[J].地球科学进展,2004,19(4):577-584.

[32] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.

[33] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.

[34] 赵宏波,余涤非,苗长虹,等.基于 POI 数据的郑州市文化设施的区位布局特征与影响因素研究[J].地理科学,2018,38(9):1525-1534.

[35] 任嘉敏,马延吉.东北地区工业污染时空格局演变研究[J].环境科学学报,2018,38(5):2108-2118.



(上接第 319 页)

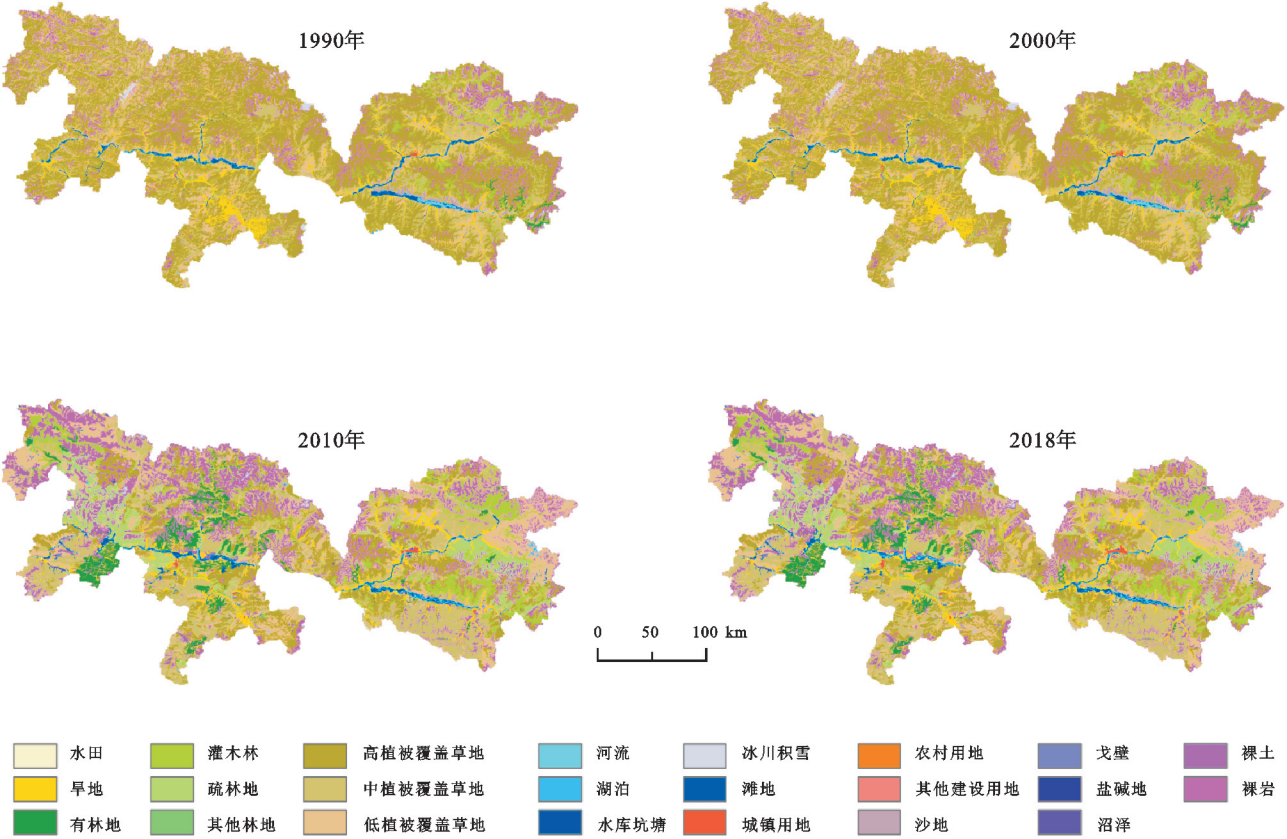
[30] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2017,575:1538-1545.

[31] 黄麟,曹巍,吴丹,等.西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征[J].自然资源学报,2016,31(4):543-555.

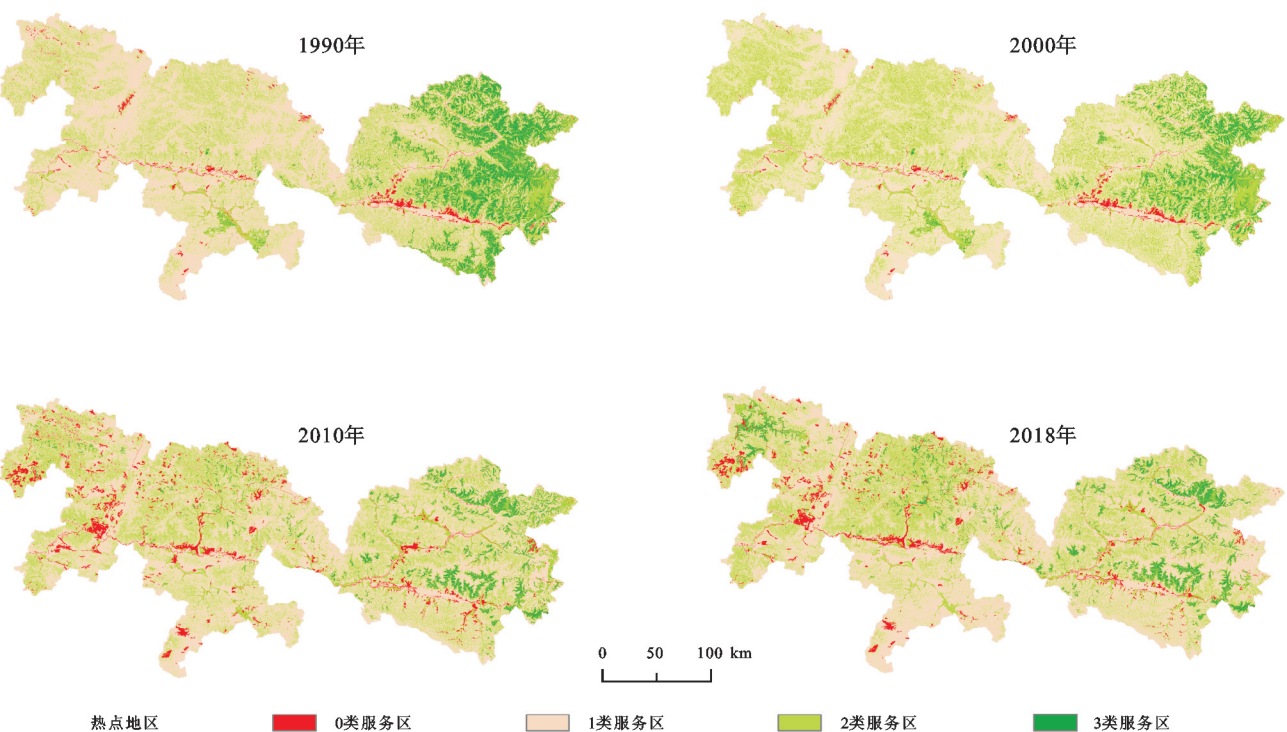
[32] 张华国.试论新时期西藏“一江两河”农业生态流域资源开发和经济发展的生态环境问题及对策[J].西藏农业科技,2017,39(2):40-44.

[33] Niu Q, Liu L, Heng J, et al. A multi-index evaluation of drought characteristics in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibetan Plateau, Southwest China[J]. Frontiers in Earth Science, 2020,8. DOI: 10.3389/feart.2020.00213.

[34] 拉珍,拉巴,陈涛,等.基于 TVDI 的西藏“一江两河”地区干旱监测研究[J].高原山地气象研究,2015,35(4):48-52.



附图1 1990—2018年一江两河流域土地覆被类型时空分布(第316页)



附图2 1990—2018年一江两河流域多重生态系统服务热点地区分布(第317页)