

DOI: 10.5846/stxb202110092798

刘树超, 邵全琴, 牛丽楠, 宁佳, 刘国波, 张雄一, 黄海波. 长江上游生态状况变化及其服务功能权衡与协同. 生态学报, 2023, 43(3): 1028-1039.

Liu S C, Shao Q Q, Niu L N, Ning J, Liu G B, Zhang X Y, Huang H B. Changes of ecological and the characteristics of trade-offs and synergies of ecosystem services in the upper reaches of the Yangtze River. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1028-1039.

长江上游生态状况变化及其服务功能权衡与协同

刘树超^{1,2}, 邵全琴^{1,2,*}, 牛丽楠^{1,2}, 宁佳¹, 刘国波^{1,2}, 张雄一^{1,2}, 黄海波¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用地面和遥感数据, 采用 GIS 分析与模型模拟等方法, 计算并分析了 2000—2019 年长江上游生态系统宏观结构、生态系统质量和生态系统服务的时空变化状况, 利用相关分析法定量评估了生态系统服务的权衡与协同关系, 并讨论了生态系统变化对生态系统服务的影响。结果表明: (1) 长江上游聚落生态系统面积增加显著, 农田和荒漠面积明显减少, 陆地生态系统以草地、森林和农田之间转换为主。(2) 2000—2019 年, 长江上游生态系统质量和服务总体稳定向好, 部分区域转差。植被固碳量整体呈增加趋势, 局部降低, 多年递增速率为 1.65 Tg/a; 土壤保持服务功能呈波动中上升趋势, 多年递增速率为 2.20 t hm⁻² a⁻¹; 水源涵养服务功能轻微下降, 部分年际间变化较大。(3) 长江上游生态系统的植被固碳与土壤保持、水源涵养与土壤保持之间以协同关系为主, 植被固碳与水源涵养之间的权衡和协同关系比例相近。(4) 气候是影响生态系统服务变化的主导因素, 人类活动影响生态系统服务变化, 最终改变生态系统服务之间的协同与权衡关系。

关键词: 长江上游; 生态系统服务; 权衡协同; 时空变化

Changes of ecological and the characteristics of trade-offs and synergies of ecosystem services in the upper reaches of the Yangtze River

LIU Shuchao^{1,2}, SHAO Quanqin^{1,2,*}, NIU Linan^{1,2}, NING Jia¹, LIU Guobo^{1,2}, ZHANG Xiongyi^{1,2}, HUANG Haibo¹

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The upper reaches of the Yangtze River is an important ecological security barrier and water conservation area of the Yangtze River basin, bearing the major national strategies such as Development of the West Regions and development of the Yangtze River Economic Belt. It is important to understand the status of ecological environment and ecosystem services in the upper reaches of the Yangtze River in the past 20 years. Based on ground and remote sensing data, combined with GIS analysis and the model simulation, we calculated the spatio-temporal changes of ecosystem macro-structure, ecosystem quality and ecosystem services in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2019, and quantitatively evaluated the trade-offs and synergies of ecosystem services by using correlation analysis, then discussed the impact of ecosystem change on ecosystem services. The results showed that: (1) from 2000 to 2019, the area of settlement ecosystem in the upper reaches of the Yangtze River increased significantly, with an increased of 239.39%. The area of farmland and desert ecosystem decreased significantly, decreased by 5.27% and 21.09%, respectively. The ecosystem was mainly conversion between grassland, forest and farmland. (2) From 2000 to 2019, the ecosystem quality and ecosystem services in the upper

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (20&ZD096)

收稿日期: 2021-10-09; 网络出版日期: 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaoqq@igsnrr.ac.cn

reaches of the Yangtze River improved steadily, but deteriorated in some regions. The areas with average FVC greater than 60% accounted for 82.19% in the upper Reaches of the Yangtze River, and FVC showed an increasing trend. The carbon sequestration of vegetation increased as a whole, but decreased locally, with an annual increase rate of 1.65 Tg/a. The soil conservation showed a trend of fluctuating upward, with an annual increasing rate of $2.20 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The water conservation showed a trend of slight downward, and some of them varied greatly from year to year. (3) In the upper reaches of the Yangtze River, there were synergistic relationships between carbon sequestration and soil conservation, water conservation and soil conservation. The synergistic relationships between carbon sequestration and soil conservation were mainly distributed in the western of Qinling Mountains, Sichuan Basin and the eastern of Yunnan-Guizhou Plateau. The synergistic relationships between water conservation and soil conservation were mainly located in the eastern of the Qinghai-Tibet Plateau, the western of the Qinling Mountains and the southern of the Daba Mountain. The trade-off and synergistic relationships between carbon sequestration and water conservation were similar, and the trade-off of ecosystem services were mainly located in the Hengduan Mountains and part of Yunnan-Guizhou Plateau. (4) Climate was the dominant factor in changes of ecosystem services, while human activities (ecological projects or urban expansion) affected increases or decreases functions of ecosystem services, and ultimately changed the trade-off and synergy among ecosystem services.

Key Words: upper reaches of the Yangtze River; ecosystem services; trade-off and synergy; spatio-temporal change

生态系统为人类提供支持、调节、供给和文化等服务^[1]。生态系统服务与生态系统的组成和结构有关,土地利用和气候的变化能改变生态系统的结构、过程和功能,使生态系统服务及其相互关系发生极大变化^[2],增加了生态系统服务的不确定性。生态系统服务以复杂的方式相互作用,权衡与协同是生态系统服务之间的典型关系。权衡是生态系统服务之间的此消彼长^[3],主要在供给与调节服务之间^[4]或两种调节服务之间^[5];协同是生态系统服务之间的相互增益,主要在调节与支持服务之间^[6-7]。探究生态系统服务的时空动态变化及其相互关系,分析其时空格局、区域差异和驱动机制^[2],是生态环境可持续发展需要关注的重点问题^[8-9],有利于提高生态系统的总体效益。但关于生态系统服务相互作用的机理研究及尺度效应尚不明确,权衡与协同关系的时空动态变化特征及驱动机制有待深入研究^[10-11]。

生态系统服务的时空变化及其之间的相互关系是生态系统服务研究的重要内容,国内外学者对此做了大量研究。Wang 等^[12]利用遥感和模型模拟方法研究了退耕还林工程对滇西北地区生态系统服务的影响,发现在小流域尺度上,随着退耕还林实施程度的提高,土壤保持得到改善,但植被净初级生产力(NPP)和产水量有所下降。傅伯杰等^[13]采用生态系统服务权衡及区域集成方法,在黄土高原地区进行多种生态系统服务综合评估,得出土地利用变化与土壤保持、碳固定具有正效应,与产水量间存在负效应。这些学者探讨了土地利用变化对生态系统服务的影响,未讨论生态系统服务之间的相互关系。Raudsepp-Hearne 等^[14]以加拿大魁北克省区为例,研究了供给、文化和调节等共 12 项生态系统服务的相互作用,在 66 组生态系统服务功能关系中发现 34 组为显著相关。Pan 等^[15]以青藏高原当雄县高寒草地生态系统为研究对象,量化了 2000—2010 年肉类供给服务的变化,并与固碳和水源涵养服务变化进行对比分析,得出肉类供给服务增加,造成了固碳服务和水源涵养服务下降。陈心盟等^[16]分析了青藏高原在 1990—2015 年的产水、固碳和气候调节三种生态系统服务,发现气候调节与产水、固碳与产水间存在权衡关系,而气候调节与固碳则是协同关系。方露露等^[17]对长江、黄河流域的 NPP、土壤保持和产水服务进行时空变化分析,并研究了生态系统服务之间的权衡协同关系和约束效应,得出长江、黄河流域的 NPP、土壤保持和产水服务之间互为协同关系。这部分学者研究了不同生态系统服务间的权衡与协同关系,但均未考虑生态系统宏观结构的变化对生态系统服务的影响。

长江上游是具有全球意义的生态脆弱带和全球环境变化的敏感区,也是长江流域以及南水北调受水区重要的生态安全屏障和水源涵养地,承载着西部大开发和长江经济带发展等重大国家战略,在国家经济社会发展中具有重要的地位。改革开放以来,长江上游经济迅速增长,但资源的无序利用和过度开发损害了长江上

游的生态环境,导致流域内水土流失严重,生物多样性遭到破坏^[18-19]。叠加气候异常和地质地貌等自然因素的影响,1998 年长江爆发特大洪水灾害,造成了重大损失^[20];同年 11 月,国务院通过了《全国生态环境建设规划》,明确用大约 50 年的时间,“完成一批对改善全国生态环境有重要影响的工程,扭转生态环境恶化的势头”。并陆续实施了天然林资源保护、退耕还林和长江防护林体系建设(第二期、第三期)等一系列重大生态工程。2016 年 1 月,习近平总书记对长江治理提出“共抓大保护、不搞大开发”,走“生态优先、绿色发展”之路。近 5 年来,国家密集出台了一系列针对长江生态大保护的政策。一系列政策的颁布和生态工程的实施之后,近 20 年长江上游的生态环境和生态系统服务状况如何?不同生态系统服务之间有怎样的关系?生态环境对生态系统服务产生了怎样影响?围绕这些问题,本文基于地面和遥感等数据,综合运用 GIS 分析和模型模拟等方法,开展了 2000—2019 年长江上游生态系统宏观结构、生态系统质量(植被覆盖度、植被净初级生产力)和生态系统服务(固碳、土壤保持、水源涵养)的时空变化研究,探讨了生态系统服务之间的权衡与协同关系,计算并分析了生态系统变化对生态系统服务及其关系的影响,旨在为长江上游生态大保护提供理论依据和决策支持,实现区域生态、社会和经济效益的共赢。

1 研究方法 with 数据

1.1 研究区概况

长江上游(图 1)位于我国西南部,自发源地青海各拉丹东雪山至湖北省宜昌市为长江上游段,干流长度为 4511 km,约占长江总长度的 70%,流域面积为 $105.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占长江流域总面积的 58.9%。长江上游地势西高东低,地面起伏大,高差悬殊;横跨青藏高原、横断山区、松潘高原、云贵高原、四川盆地、成都平原等重要地貌类型,山区和丘陵占长江上游流域面积的 98% 左右。独特的地形特征使长江上游的气候多样,有高山高原气候、亚热带季风气候、亚热带湿润季风气候等,主要气候灾害为低温、洪涝和干旱。长江上游水能资源丰富,主要的支流有雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江等。

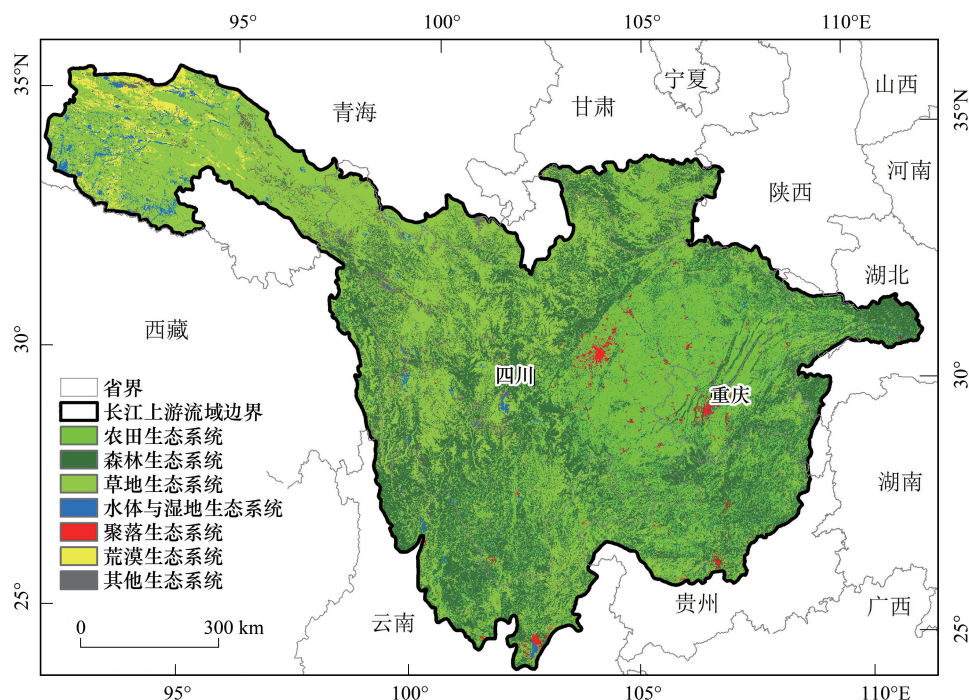


图 1 长江上游 2015 年生态系统宏观结构

Fig.1 Ecosystem structure of the upper Reaches of Yangtze River in 2015

1.2 研究数据

本文采用的研究数据包括遥感数据、土地利用数据、气象数据和地形数据等。

归一化植被指数(NDVI)数据,选取 2000—2019 年的 MODIS-NDVI 产品 MOD13Q1 数据集,时间分辨率为 16 天,空间分辨率为 250 m。植被净初级生产力(NPP)数据,直接采用了 2000—2019 年的 MODIS-NPP 产品 MOD17A3H 数据集,时间分辨率为 1 年,空间分辨率为 500 m。并利用课题组积累的历年野外调查草地样方生物量数据^[21],以及中国生态系统研究网络长期动态监测数据库的中国典型森林生态系统生产力数据集,对 MODIS NPP 数据进行了精度验证, R^2 为 0.75。

土地利用数据来自地球系统科学数据共享平台^[22],根据陆地生态系统宏观结构分类系统及其与土地利用/土地覆盖分类系统的转换关系^[23],转换为森林、草地、农田、水体与湿地、聚落、荒漠和其它生态系统共 7 个生态系统类型,生成空间分辨率为 1 km 的 2000、2005、2010、2015 年 4 期生态系统类型数据集。

气象观测数据选取中国地面气候资料日值数据集(V3.0),包括温度和日降雨量等数据。利用 AUNSPLINE 软件插值获得 1 km 分辨率的降水量数据,并将国家气象信息中心提供的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 降水格点数据和 ANUSPLIN 插值结果融合,生成 2000—2019 年的 1 km 分辨率的长江上游降水量空间数据集。

土壤数据来源于中国科学院资源环境数据中心网站的 1:100 万土壤数据库。长江上游地面数字高程模型(DEM)数据来自 ASTER GDEM,空间分辨率为 30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度

将 NDVI 数据进行 S-G 滤波处理,通过像元二分法^[24]计算得到时间分辨率为 16d 的植被覆盖度(FVC)数据,采用最大合成法生成年 FVC 数据,经重采样生成空间分辨率为 1 km 的 2000—2019 年长江上游 FVC 数据集。像元二分法计算公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中, $NDVI_{soil}$ 为研究区裸土像元的 NDVI 值,选择频率累积值为 5% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$; $NDVI_{veg}$ 为研究区纯植被像元的 NDVI 值,选择频率累积值为 95% 的 NDVI 值作为 $NDVI_{veg}$ 。

1.3.2 植被固碳

将 NPP 数据重采样至空间分辨率为 1 km,根据光合作用转换公式和长江上游植被的 NPP 值^[25],利用公式(2)计算得到长江上游植被固碳量^[26]。年固碳量计算公式如下:

$$C_{\text{年}} = \sum_1^n (1.63 \times B \times R_c) \quad (2)$$

式中, $C_{\text{年}}$ 为长江上游地区植被的年固碳量(t); B 为单位面积 NPP 值(t/km^2); R_c 为二氧化碳中 C 的比率,值为 27.27%; n 为总的栅格像元个数。

1.3.3 土壤保持

利用土壤保持量(SC)衡量研究区内生态系统减少降水导致土壤侵蚀的能力^[2]。采用修正通用水土流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)^[27]估算地块尺度土壤水蚀模数:

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C) \times P \quad (3)$$

式中, R 为降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm h}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$),由基于日降雨量资料的半月降雨侵蚀力模型^[28]估算; K 为土壤可蚀性因子($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$),采用 EPIC 模型^[29]计算,并根据 Zhang 等^[30]研究成果进行修正; LS 为坡长坡度因子,该因子采用 McCool 等^[31]和 Liu 等^[32]方法计算; C 为植被覆盖因子,采用蔡崇法等^[33]方法计算; P 为水土保持措施因子,参照刘纪远等^[23]方法计算; LS 、 C 、 P 无量纲。

利用长江源的沱沱河和直门达水文站在 1990—2018 年的含沙量监测数据对土壤保持模拟结果进行验证,沱沱河和直门达水文站对土壤保持验证结果的 R^2 均超过 0.60。最终生成 2000—2019 年 1 km 分辨率的

土壤保持服务数据集。

2.3.4 水源涵养

利用降水储存量法^[34]计算长江上游森林、草地和湿地生态系统的水源涵养量(WR),以生态系统水文调节效应衡量研究区内涵养水分的能力。

$$WR = A \times J \times R_e \quad (4)$$

$$J = J_0 \times K \quad (5)$$

$$R_e = R_0 - R_r \quad (6)$$

式中, A 为森林、草地和湿地生态系统的面积(hm^2); J 为研究区产流降雨量(mm); J_0 为研究区年降雨量(mm); K 为研究区产流降雨量占年降雨总量的比例, K 取 0.6^[23]; R_e 为与裸地相比,各生态系统减少径流的效应系数; R_0 为产流降雨条件下裸地降雨径流率; R_r 为产流降雨条件下各生态系统降雨径流率,其中,森林生态系统降雨径流率通过搜集已发表文献获得^[35],草地生态系统降雨径流率根据草地覆盖度计算^[36],湿地生态系统降雨径流率参照孟宪民等^[37]研究成果。

利用长江源的沱沱河和直门达水文站在 1990—2018 年的年径流总量监测数据对水源涵养模拟结果进行验证,沱沱河和直门达水文站对水源涵养验证结果的 R^2 依次为 0.55 和 0.80。最终生成 2000—2019 年 1 km 分辨率的水源涵养服务数据集。

2.3.5 生态系统服务权衡与协同分析方法

以 2000—2019 年长江上游生态系统固碳服务与土壤保持量、水源涵养量数据为基础,基于皮尔逊积矩(Pearson)相关系数法^[38—39],分别计算两组生态系统服务之间的相关系数,通过相关系数的零假设 T 检验判断生态系统服务之间权衡与协同关系的显著性,公式计算如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$T = \frac{\sqrt{n-k-2} \times R}{\sqrt{1-R^2}} \quad (8)$$

式中, R 为对应的偏相关系数, R 的绝对值越大则两组生态系统服务之间的相关性越强($R>0$ 时为协同, $R<0$ 时为权衡), R 的绝对值越接近于 0 则相关性越弱^[40—41]; x 和 y 为两个生态系统服务变量; n 为样本观测数,本文中 n 为 20; k 为可控制变量数, $n-k-2$ 为自由度; i 为第 i 年。当 $|T| > T_{0.05}(n-k-2)$ 时,即 $P<0.05$,拒绝原假设,相关性结果显著;当 $|T| > T_{0.01}(n-k-2)$ 时,即 $P<0.01$,拒绝原假设,相关性结果极显著, $T_{0.05}(n-k-2)$ 和 $T_{0.01}(n-k-2)$ 查阅 T 检验表确定。

2 结果与分析

2.1 生态系统宏观结构变化

2015 年,长江上游以草地生态系统为主,占研究区面积的 35.85%;其次是森林和农田生态系统,分别占 34.33%和 21.22%;聚落生态系统面积最小,仅占研究区面积的 1.14%。2000—2015 年,聚落生态系统面积增加显著,与 2000 年相比面积增加了 239.39%,水体与湿地生态系统面积增加了 29.56%,森林生态系统面积增加了 1.45%;农田、荒漠和其它生态系统的面积均减少,分别减少了 5.27%、21.09%和 10.09%;草地生态系统面积基本不变(表 1)。

构建长江上游陆地生态系统宏观结构变化转类矩阵^[42],见表 2。2000—2015 年,长江上游陆地生态系统变化的总面积为 $21.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,占研究区面积的 21.83%,以草地、森林和农田之间的转换为主。草地主要转出为森林和农田,分别占转出面积的 54.84%和 25.04%;草地面积增加主要来源于森林和农田,分别占转入面

积的 49.18%、25.04%;而水体与湿地、荒漠和其它生态系统均主要转出为草地。农田主要转出为森林和草地,其中转出为聚落的面积为 $0.69 \times 10^4 \text{ km}^2$,是聚落面积增加的主要来源。聚落面积的增加主要来自农田、森林和草地,分别占转入面积的 78.41%、10.23%和 9.09%。

表 1 长江上游 2000—2015 年各陆地生态系统面积统计/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 1 Area statistics of terrestrial ecosystems in the upper Reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

陆地生态系统类型 Terrestrial ecosystem types	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 至 2015 变化面积 Change area from 2000 to 2015	变化率 change rate/%
农田生态系统 Cropland ecosystem	22.40	20.83	22.14	21.22	-1.18	-5.27
森林生态系统 Forest ecosystem	33.84	34.98	33.97	34.33	0.49	1.45
草地生态系统 Grassland ecosystem	34.90	35.56	34.86	35.10	0.20	0.57
水体与湿地生态系统 Water and wetland ecosystem	1.59	1.41	1.62	2.06	0.47	29.56
聚落生态系统 Settlement ecosystem	0.33	0.31	0.47	1.12	0.79	239.39
荒漠生态系统 Desert ecosystem	2.56	2.59	2.56	2.02	-0.54	-21.09
其它生态系统 Other ecosystem	2.28	2.22	2.28	2.05	-0.23	-10.09

表 2 长江上游 2000—2015 年陆地生态系统宏观结构变化转类矩阵/($\times 10^4 \text{ km}^2$)

Table 2 Transformation matrix of terrestrial ecosystem structure change in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

陆地生态系统类型 Terrestrial ecosystem types		2015						
		农田 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	水体与湿地 Water and wetland	聚落 Settlement	荒漠 Desert	其它 Other
2000	农田	16.49	3.30	1.68	0.22	0.69	0	0.01
	森林	2.95	27.34	3.30	0.10	0.09	0	0.06
	草地	1.63	3.57	28.39	0.47	0.08	0.24	0.52
	水体与湿地	0.09	0.03	0.22	1.15	0.02	0.07	0.01
	聚落	0.06	0.01	0.01	0.01	0.23	0	0
	荒漠	0	0	0.55	0.08	0	1.70	0.23
	其它	0	0.07	0.95	0.02	0	0.01	1.23

2.2 生态系统质量变化

2019 年长江上游植被覆盖度为 77.90%,2000—2019 年的平均值为 76.68%。2000—2019 年,长江上游平均植被覆盖度大于 60%的地区占长江上游面积的 82.19%,植被覆盖度较高;长江源区沱沱河流域和楚玛尔河流域植被覆盖度不足 10%,该地区位于青藏高原,多年平均气温在 0℃ 以下,降水不足,植被稀少。采用最小二乘法计算 2000—2019 年植被覆盖度的变化斜率,呈增加趋势($R^2=0.55, P<0.01$),局部降低,部分年际之间变化较大;植被覆盖度增加地区主要位于秦岭西部山地、云贵高原、四川盆地和长江上游干流区,减少地区主要位于四川盆地边缘的成都市和重庆市附近(图 2)。

2.3 生态系统服务时空动态变化

采用最小二乘法分别计算 2000—2019 年长江上游植被固碳量、土壤保持量和水源涵养量的变化斜率。

2019 年长江上游植被固碳总量为 235.07 Tg($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$),2000—2019 年的平均固碳总量为 218.22 Tg。植被固碳量最高地区主要位于金沙江流域下游和云贵高原地区,最低区域位于青藏高原的长江源地区。植被固碳量呈稳定递增趋势($R^2=0.76, P<0.01$),多年递增速率为 1.65 Tg/a,增加最大地区主要在四川盆地(图 3)。

2019 年长江上游土壤保持量为 100.69 t/hm²,2000—2019 年的平均土壤保持量为 74.08 t/hm²。土壤保持量呈增长趋势($R^2=0.75, P<0.01$),多年递增速率为 2.20 t/hm² a⁻¹,反映生态系统土壤保持服务功能稳定向好。空间上土壤保持量增加地区主要位于松潘高原和秦岭西部地区,是水蚀较为强烈的岷—沱江流域和嘉

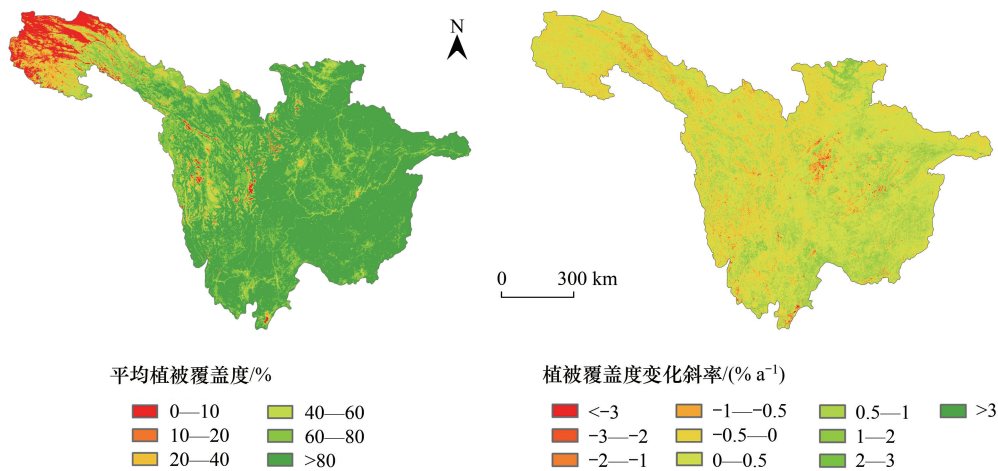


图2 2000—2019年长江上游地区平均植被覆盖度及植被覆盖度年变化斜率空间分布

Fig.2 Distribution of annual mean and change rate of FVC in the upper Reaches of the Yangtze River from 2000 to 2019

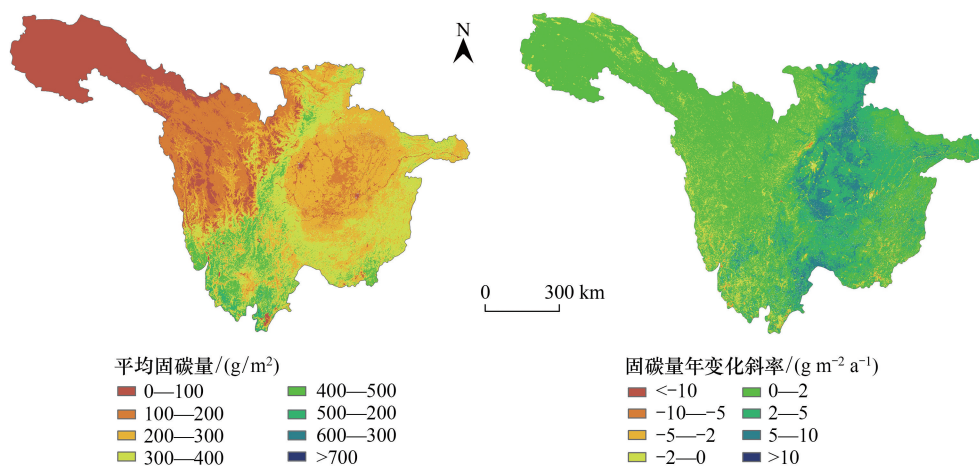


图3 2000—2019年长江上游平均植被固碳量及植被固碳量年变化斜率空间分布

Fig.3 Distribution of annual mean and change rate of carbon sequestration in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2019

陵江流域的上游地区;减少地区主要分布在横断山脉地区(图4)。

2019年长江上游水源涵养量为 $11.31 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,略高于2000—2019年的平均水源涵养量 $10.81 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。水源涵养量较大地区主要位于横断山脉、云贵高原、松潘高原和大巴山南侧地区,较小地区位于长江源区和四川盆地。2000—2019年水源涵养量呈轻微下降趋势($R^2 = 0.18, P < 0.05$),部分年际间波动较大,空间上增减各半,减少地区主要分布于长江源区、金沙江流经的横断山区和云贵高原地区(图5)。

2.4 长江上游生态系统服务权衡与协同

2.4.1 植被固碳与土壤保持

长江流域上游地区植被固碳与土壤保持以协同关系为主,面积占比为77.88%,权衡关系和不相关地区的面积较少(图6)。其中,表现为协同关系的面积为 $74.28 \times 10^4 \text{ km}^2$,极显著和显著协同关系面积为 $25.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,占长江流域上游地区面积的27.06%;表现为权衡关系的面积为 $19.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,极显著和显著权衡关系面积为 $0.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,仅占0.61%。青藏高原长江源区、横断山区和松潘高原的部分地区呈显著权衡关系,秦岭西部山地、四川盆地和云贵高原东部地区呈极显著协同关系。

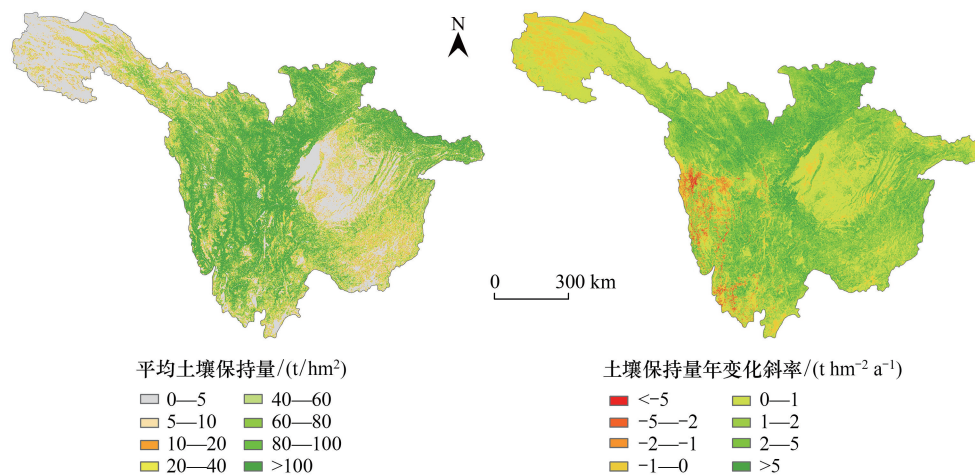


图 4 2000—2019 年长江上游地区平均土壤保持量及土壤保持量年变化斜率空间分布

Fig.4 Distribution of annual mean and change rate of soil conservation in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2019

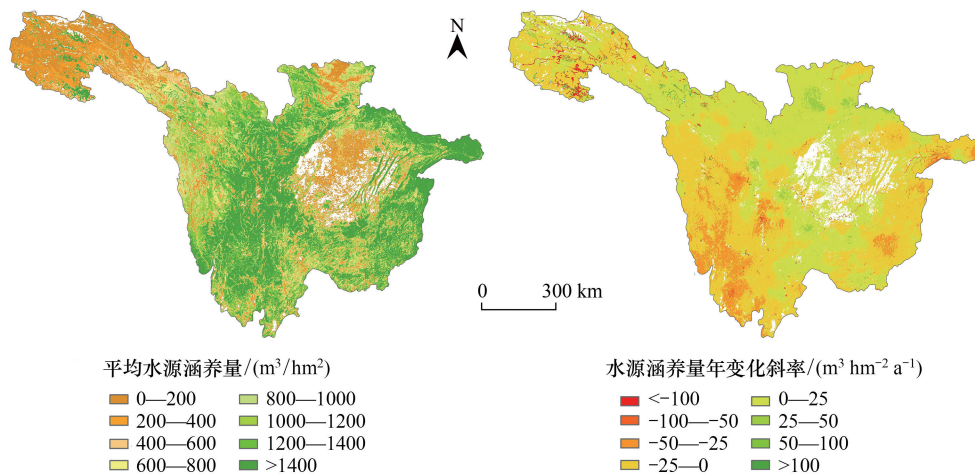


图 5 2000—2019 年长江上游多年平均水源涵养量及水源涵养量年变化斜率空间分布

Fig.5 Distribution of annual mean and change rate of water conservation in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2019

2.4.2 植被固碳与水源涵养

长江流域上游地区植被固碳与水源涵养之间的协同与权衡关系的比例分别为 51.10% 和 46.70%, 不相关地区的面积较少(图 7)。其中, 表现为协同关系的面积为 $47.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 极显著和显著协同关系面积为 $5.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占长江流域上游地区面积的 6.24%; 表现为权衡关系的面积为 $43.06 \times 10^4 \text{ km}^2$, 极显著和显著权衡关系面积为 $4.10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 4.44%。横断山区、云贵高原北部的局部地区为权衡关系, 秦岭西部山地和云贵高原东部地区呈现极显著协同关系。

2.4.3 水源涵养与土壤保持

长江上游水源涵养与土壤保持以协同关系为主, 占长江上游面积的 71.45%, 权衡关系和不相关地区占比分别为 15.17% 和 13.38% (图 8)。表现为协同关系的面积为 $64.23 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 极显著和显著协同关系的面积为 $30.12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占长江流域上游地区面积的 32.33%; 表现为权衡关系的面积为 $11.42 \times 10^4 \text{ km}^2$, 极显著和显著权衡关系面积为 $0.58 \times 10^4 \text{ km}^2$, 仅占 0.85%。青藏高原的沱沱河流域、松潘高原、秦岭西部山地和大巴山南侧地区以极显著协同关系为主, 横断山区、云贵高原北部和乌江流域以权衡关系为主, 不相关地区主要分布在四川盆地。

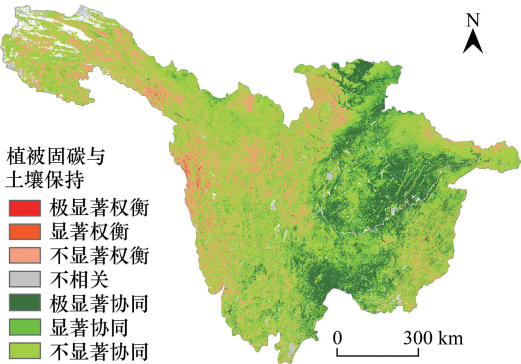


图6 长江上游植被固碳与土壤保持服务权衡与协同关系空间分布
Fig.6 Spatial distribution of trade-off synergies between carbon sequestration and soil conservation in the upper Reaches of the Yangtze River

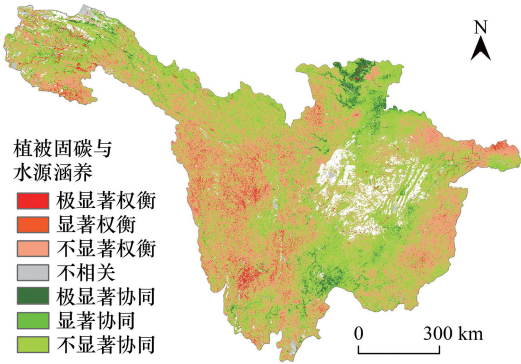


图7 长江上游植被固碳与水源涵养服务权衡与协同关系空间分布
Fig.7 Spatial distribution of trade-off synergies between carbon sequestration and water conservation in the upper Reaches of the Yangtze River

2.5 生态系统宏观结构变化对生态系统服务的影响

2.5.1 典型生态系统变化对生态系统服务的影响

以农田、森林和草地生态系统作为典型生态系统,利用 GIS 空间叠加分析其对生态系统服务变化速率的影响。其中,未变化是指 2000—2015 年生态系统类型未发生变化的地区,变化是指 2015 年各类生态系统除未变化外增加的地区(表 3)。与未变化的地区相比,农田生态系统变化地区的植被固碳年均变化速率下降了 23.55%,土壤保持增加了 58.06%;森林生态系统变化地区的植被固碳年均变化速率增加了 33.56%,土壤保持轻微下降,水源涵养年均变化速率增加了 57.14%;草地生态系统变化地区的固碳和土壤保持的年均变化速率分别增加了 65.93%和 23.15%。3 类典型生态系统的变化对固碳和土壤保持服务影响较大,除森林生态系统外,农田和草地生态系统的变化对水源涵养服务影响较小。

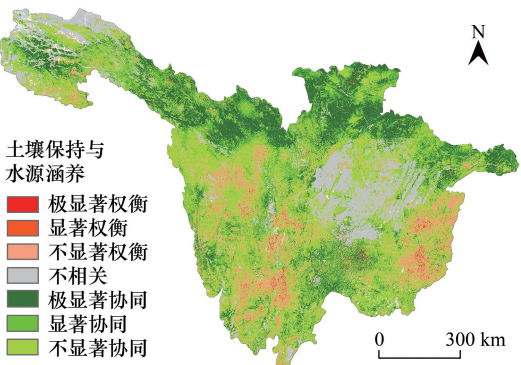


图8 长江上游水源涵养与土壤保持服务权衡与协同关系空间分布
Fig.8 Spatial distribution of trade-off synergies between water conservation and soil conservation in the upper Reaches of the Yangtze River

表 3 2000—2019 年典型生态系统的生态系统服务变化速率

Table 3 Change rates of ecosystem services in typical ecosystems from 2000 to 2019

生态系统服务变化速率 Change rates of ecosystem services	农田生态系统 Cropland ecosystem		森林生态系统 Forest ecosystem		草地生态系统 Grassland ecosystem	
	未变化 Unchange	变化 Change	未变化 Unchange	变化 Change	未变化 Unchange	变化 Change
固碳量变化速率 Change rates of carbon sequestration/(g m ⁻² a ⁻¹)	3.44	2.63	1.46	1.95	0.91	1.51
土壤保持量变化速率 Change rates of soil conservation/(t hm ⁻² a ⁻¹)	1.55	2.45	2.84	2.77	2.03	2.50
水源涵养量变化速率 Change rates of water conservation/(m ³ hm ⁻² a ⁻¹)	-0.02	-0.03	-0.07	-0.03	-0.02	-0.02

2.5.2 典型生态系统变化对生态系统服务权衡与协同关系的影响

采用 GIS 空间叠加分析生态系统的变化对生态系统服务权衡与协同关系的影响(表 4)。与各生态系统类型未变化地区相比,除农田生态系统外,森林和草地生态系统的变化地区在植被固碳与土壤保持协同关系中面积比例均增加,权衡关系的面积比例基本不变;3 类典型生态系统变化地区在植被固碳与水源涵养协同关系的面积比例均增加,而森林生态系统变化地区权衡关系面积的比例减少;除草地生态系统外,农田和森林生态系统变化地区在水源涵养与土壤保持协同关系的面积比例均增加。典型生态系统变化对生态系统服务之间权衡关系影响较小。

表 4 典型生态系统的不同生态系统服务之间权衡与协同关系的面积/%
Table 4 Area of trade-off and synergy of different ecosystem services in typical ecosystems

生态系统服务权衡与协同 Trade-offs synergies of ecosystem services		农田生态系统 Cropland ecosystem		森林生态系统 Forest ecosystem		草地生态系统 Grassland ecosystem	
		未变化 Unchange	变化 Change	未变化 Unchange	变化 Change	未变化 Unchange	变化 Change
固碳服务与土壤保持	极显著和显著协同	60.94	44.90	19.44	30.27	14.25	24.74
Carbon sequestration and soil conservation	极显著和显著权衡	0.30	0.75	0.88	1.04	0.46	0.65
固碳服务与水源涵养	不显著或不相关	38.76	54.35	79.68	68.69	85.29	74.61
Carbon sequestration and water conservation	极显著和显著协同	7.61	9.23	1.98	3.81	8.61	10.34
水源涵养与土壤保持	极显著和显著权衡	1.46	3.06	5.99	4.26	4.05	4.54
Water conservation and soil conservation	不显著或不相关	90.93	87.71	92.03	91.93	87.34	85.12
水源涵养与土壤保持	极显著和显著协同	19.43	34.09	28.31	32.90	46.49	39.79
Water conservation and soil conservation	极显著和显著权衡	0.48	1.36	1.69	0.80	0.36	0.48
水源涵养与土壤保持	不显著或不相关	80.09	64.55	70.00	66.30	53.15	59.73

3 讨论

2000—2015 年,长江上游陆地生态系统以草地、森林和农田生态系统为主,占整个长江上游面积的 90% 以上,聚落生态系统面积增长迅速。长江上游生态系统类型的变化与国家实施退耕还林、天然林保护、长江防护林体系建设(第二期、第三期)等生态工程息息相关^[43]。研究表明,在 2000—2015 年期间,云贵川等地有大面积的耕地转为森林、草地^[22,44],2000 年以来退耕还林(草)工程的实施是长江上游植被覆盖度增加、植被固碳服务提高的主要原因。聚落生态系统面积的增加则与长江上游各省市经济迅速增长有关,主要表现为以成都市和重庆市为中心,周边城市群迅速发展,以占用部分农田、森林和草地为发展代价。

对长江上游生态系统服务相关性研究结果表明,长江上游植被固碳与土壤保持、土壤保持与水源涵养以协同关系为主,植被固碳与水源涵养之间的权衡和协同关系比例相近,且空间格局上存在差异。生态工程实施以来,长江上游的植被覆盖整体水平较高,植被固碳量增加;植被增加抑制了土壤侵蚀作用,在地形比较平坦的成都平原、云贵高原等地区,土壤保持量增加,植被固碳与土壤保持呈协同关系。而植被覆盖度较高的地区一般降水较为丰富,在青藏高原边缘、横断山区等地势陡峭的局部地区,因降水增加导致土壤侵蚀加剧,土壤保持量减少,水源涵养量降低,植被固碳与土壤保持、植被固碳与水源涵养呈权衡关系,但水源涵养与土壤保持在该地区呈协同关系。水源涵养和土壤保持在河谷地区以权衡关系为主,在山坡等地区以协同关系为主。对于表现为权衡关系的横断山区、云贵高原的部分地区,生态系统服务均有不同程度的削弱,此类地区成为植被固碳、土壤保持、水源涵养的低值中心。研究表明,生态系统服务权衡和协同关系存在尺度特征^[9],未来应加强流域生态系统服务权衡和协同关系尺度特征与区域差异的研究。

生态系统服务的变化受气候因素和人类活动(主要为生态工程、城镇建设和农业生产等)共同影响^[45]。采用模型变量控制法^[46—47]厘定人类活动与气候对长江上游土壤保持服务变化的贡献率,控制 RUSLE 方程中的气候参数(温度和降水)不变,分别估算真实气候下和固定气候下的土壤水蚀模数。其中,真实气候下的结

果受气候因素和人类活动的共同影响,而固定气候下的结果仅受人类活动的影响。得出气候因素对长江上游 2000—2019 年土壤保持服务变化的贡献率为 77.29%,人类活动对土壤保持服务变化的贡献率为 22.71%,气候因素是生态系统服务变化的主要影响因素^[48]。而人类活动改变了生态系统的宏观结构,导致生态系统服务变化^[49]。生态系统服务的变化改变了生态系统服务之间的权衡与协同关系,长江上游森林生态系统变化地区在 3 组生态系统服务关系中的协同程度均高于未变化地区,农田生态系统变化地区在植被固碳与土壤保持协同程度、草地生态系统变化地区在水源涵养与土壤保持协同程度均低于各自未变化地区。同时,本文仅选择了 3 种生态系统服务,并不能代表长江上游整个生态系统服务的时空变化和相互关系,仍需进一步考虑其他生态系统服务的变化情况,需深入分析各类生态系统服务在空间上的权衡与协同关系,结合局部的空间分布特征制定生态保护政策。

4 结论

本文探究了 2000—2019 年长江上游的生态状况变化及生态系统服务的权衡与协同机制,讨论了生态系统变化对生态系统服务及其相互关系的影响,得出以下结论:

(1) 2000—2015 年,长江上游聚落生态系统面积增加了 $0.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,增长了 239.39%;森林、水体与湿地生态系统面积分别增加了 $0.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,农田生态系统和荒漠生态系统面积分别减少了 $1.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.54 \times 10^4 \text{ km}^2$;陆地生态系统以草地、森林和农田之间转换为主。

(2) 2000—2019 年,长江上游生态系统质量和服务总体稳定向好,部分区域转差。长江上游植被覆盖度呈增加趋势,局部降低;生态系统植被固碳服务呈增加趋势,土壤保持服务呈波动中上升趋势,水源涵养服务轻微下降,但部分年际间变化较大。

(3) 长江上游的固碳服务与土壤保持之间以协同关系为主,协同地区主要分布于秦岭西部、四川盆地和云贵高原东部地区;固碳服务与水源涵养之间的权衡和协同关系的比例相近,协同地区主要分布于秦岭西部,权衡地区主要分布在横断山区;水源涵养与土壤保持之间以协同关系为主,协同地区主要位于青藏高原东部、松潘高原、秦岭西部和大巴山南侧。

(4) 气候是生态系统服务变化的主导因素,人类活动影响生态系统服务变化。森林生态系统变化地区的生态系统服务协同程度大于未变化地区,农田生态系统变化地区在植被固碳与土壤保持的协同程度、草地生态系统变化地区在水源涵养与土壤保持的协同程度均低于各自未变化地区。

参考文献 (References):

- [1] Assessment Millennium Ecosystem. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Washington, DC, USA: Island Press, 2005.
- [2] 黄麟,祝萍,曹巍.中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响.生态学报, 2021, 41(3): 1178-1188.
- [3] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M., Cumming G S. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. Ecology and Society, 2006, 11: art28.
- [4] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [5] Zheng Z M, Fu B J, Hu H T, Sun G. A method to identify the variable ecosystem services relationship across time: a case study on Yanhe Basin, China. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1689-1696.
- [6] Ruiz-Frau A, Hinz H, Edwards-Jones G, Kaiser M J. Spatially explicit economic assessment of cultural ecosystem services: Non-extractive recreational uses of the coastal environment related to marine biodiversity. Marine Policy, 2013, 38: 90-98.
- [7] 张文静. 南四湖流域生态系统服务权衡与协同关系研究[D].曲阜: 曲阜师范大学, 2021.
- [8] 彭建,胡晓旭,赵明月,刘焱序,田璐.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策.地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [9] 李理,赵芳,朱连奇,何莎莎,叶露培.淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测.生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [10] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系.生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [11] 尹礼唱,王晓峰,张琨,肖飞艳,程昌武,张欣蓉.国家屏障区生态系统服务权衡与协同.地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [12] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, Liu Y X, Chen Y Q. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China. Science of the Total Environment, 2017, 574: 57-64.

- [13] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [14] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. 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] Pan Y, Wu J X, Xu Z R. Analysis of the tradeoffs between provisioning and regulating services from the perspective of varied share of net primary production in an alpine grassland ecosystem. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 79-86.
- [16] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 张欣蓉, 罗广祥. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34.
- [17] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [18] 刘冬, 杨悦, 邹长新. 长江经济带大保护战略下长江上游生态屏障建设的思考. 环境保护, 2019, 47(18): 22-25.
- [19] 文传浩, 林彩云. 长江经济带生态大保护政策: 演变、特征与战略探索. 河北经贸大学学报, 2021, 42(5): 70-77.
- [20] 李文华. 长江洪水与生态建设. 自然资源学报, 1999, 14(1): 1-8.
- [21] Fan J W, Zhong H P, Harris W, Yu G R, Wang S Q, Hu Z M, Yue Y Z. Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change*, 2008, 86(3/4): 375-396.
- [22] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [23] 刘纪远, 邵全琴, 于秀波, 黄河清. 中国陆地生态系统综合监测与评估. 北京: 科学出版社, 2016.
- [24] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 周为峰, 颜长珍. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [25] 徐茜, 王晓峰, 任志远, 李晶. 草地植被净第一性生产力及固碳释氧量的估算. 测绘科学, 2012, 37(5): 132-134, 144.
- [26] 刘璐璐, 邵全琴, 曹巍, 吴丹, 巩国丽, 樊江文. 基于生态服务价值的三江源生态工程成本效益分析. 草地学报, 2018, 26(1): 30-39.
- [27] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, Porter J P. RUSLE: revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46: 30-33.
- [28] 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. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [29] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 421-428.
- [30] Zhang K L, Shu A P, Xu X L, Yang Q K, Yu B. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1002-1011.
- [31] McCool D K, Brown L C, Foster G R, Mutchler C K., Meyer L D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [32] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [33] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [34] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [35] 吴丹. 中国主要陆地生态系统水源涵养服务研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [36] 李元寿, 王根绪, 王一博, 王军德, 贾晓红. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究. 水科学进展, 2006, 17(5): 616-623.
- [37] 孟宪民, 崔保山, 邓伟, 吕宪国. 松嫩流域特大洪灾的警示: 湿地功能的再认识. 自然资源学报, 1999, 14(1): 14-21.
- [38] 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.
- [39] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. 生态学报, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [40] 杨强强, 徐光来, 李爱娟, 刘永婷, 胡春生. 青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究. 生态学报, 2021, 41(23): 9315-9327.
- [41] 吴丹, 邹长新, 林乃峰, 徐梦佳. 长江经济带生态系统服务权衡与协同关系研究. 环境生态学, 2021, 3(9): 1-7.
- [42] 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 樊江文. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.
- [43] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [44] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [45] 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. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [46] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.
- [47] 高尚玉, 张春来, 邹学勇. 京津风沙源治理工程效益. 北京: 科学出版社, 2008.
- [48] Cai D W, Ge Q S, Wang X M, Liu B L, Goudie A S, Hu S. Contributions of ecological programs to vegetation restoration in arid and semiarid China. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(11): 114046.
- [49] 庄长伟, 黄钟德, 杨张茜. 流溪河流域土地利用变化对生态系统服务的影响研究. 环境科学与管理, 2021, 46(8): 151-155.