

DOI: 10.5846/stxb201806031238

卢慧婷, 黄琼中, 朱捷缘, 郑天晨, 严岩, 吴钢. 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. 生态学报, 2018, 38(24): - .
Lu H T, Huang Q Z, Zhu J Y, Zheng T C, Yan Y, Wu G. Ecosystem type and quality changes in the Lhasa River Basin and their effects on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

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

卢慧婷^{1,2}, 黄琼中³, 朱捷缘^{2,4}, 郑天晨^{1,2}, 严岩^{1,*}, 吴钢¹

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 西藏自治区环境监测中心站, 拉萨 850000

4 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

摘要: 在气候变化和人类活动干扰驱动下, 地表生态系统的类型和质量都在发生复杂的变化, 进而对生态系统服务和人类福祉产生深远影响。青藏高原的生态重要性和生态敏感性显著, 其生态系统和生态服务的变化对区域和我国的生态安全具有重要的影响和指示意义。为了揭示拉萨河流域近年来的生态系统变化导致的生态系统服务变化, 尤其是生态系统质量变化及其对生态系统服务的影响, 选择 NDVI 作为生态系统质量变化的指示因子, 通过对 InVEST 模型中与植被相关的各参数进行计算和修正, 结合生态系统类型变化, 评估了 1990—2015 年间拉萨河流域水土保持、水源涵养和固碳三项生态系统服务的变化, 进而分析了生态系统类型和质量变化对其的影响。研究结果表明, 1990—2015 年拉萨河流域生态系统类型变化整体相对较小, 但是人工表面和湿地面积变化速率较快; 1990—2000 年生态系统质量整体有显著上升, 2000 年以后略有下降, 其中 2000—2015 年草甸和草原 NDVI 分别下降了 7.48% 和 5.44%, 呈现明显退化趋势; 1990—2015 年拉萨河流域水土保持和固碳服务分别增加了 3.98% 和 9.12%, 而水源涵养服务降低了 23.05%, 各项生态系统服务变化主要发生在 1990—2000 年; 总体来看, 生态系统类型变化引起的生态系统服务变化相对较小, 而生态系统质量变化对流域生态系统服务的影响显著, 尤其是 1990—2000 年间; 但 2000 年以后生态系统类型变化对生态系统服务变化的贡献有所加大。

关键词: 生态系统服务; 生态系统质量; InVEST 模型; NDVI; 青藏高原

Ecosystem type and quality changes in the Lhasa River Basin and their effects on ecosystem services

LU Huiting^{1,2}, HUANG Qiongzong³, ZHU Jieyuan^{2,4}, ZHENG Tianchen^{1,2}, YAN Yan^{1,*}, WU Gang¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Environmental Monitoring Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

4 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Due to the impact of climate change and human activities, both the type and quality of ecosystems are changing in complex ways. As a result, ecosystem services and human well-being are profoundly affected. Nevertheless, how the ecosystem quality change affects ecosystem services is often neglected in previous studies. Compared with the dominant and obvious change in ecosystem types (or land cover types), the change of ecosystem quality is more subtle and continuous. However, the ecosystem quality change usually involves a much wider range, and may cause greater influence to the

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502102); 西藏自治区科技计划项目 (Z2016C01G01108)

收稿日期: 2018-06-03; **修订日期:** 2018-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

ecosystem resilience, function and services. Since the Tibetan Plateau is of great ecological importance and one of the most sensitive areas to climate change, it is desired to study the ongoing changes of the ecosystem and its services. Located at the south-east part of the Tibetan Plateau, the Lhasa River Basin is the center of Tibet Autonomous Region in terms of economy, agriculture and demography. To reveal the recent ecosystem changes and the consequent service changes of the Lhasa River Basin, especially the change in the ecosystem quality and its effects, we selected the growing season (from June to October) NDVI as the indicating factor of ecosystem quality to adjust the parameters of the InVEST model, and then assessed three ecosystem services (soil retention, seasonal water yield and carbon storage) from 1990 to 2015. The effects of the ecosystem type change and ecosystem quality change on ecosystem services, as well as their relative contributions, were then analyzed. The main conclusions are as follows: (1) from 1990 to 2015, the overall ecosystem type change is insignificant, and the change mainly occurred during the last 5 years. However, the area of artificial surfaces and wetland increased sharply by 82.65% and 32.40%, respectively. (2) The growing season NDVI of all vegetation types increased significantly between 1990 and 2000, and then slightly decreased afterwards. The growing season NDVI of meadow and grassland decreased by 7.48% and 5.44% respectively, from 2000 to 2015, indicating an obvious degradation trend. (3) Overall, from 1990 to 2015, the ecosystem service changes caused by ecosystem type change are relatively small, while the ecosystem quality change has rather remarkable effects on the ecosystem services. From 1990 to 2000, the soil retention and carbon storage increased by 4.63% and 12.05% respectively, and the baseflow decreased by 22.14%; the contributions of ecosystem quality to these changes were 100.22%, 99.99% and -99.78% respectively. From 2000 to 2015, the soil retention, baseflow and carbon storage decreased by 0.62%, 1.17% and 2.62%, respectively; the contributions of ecosystem quality to these changes were -89.28%, 40.21% and -126.12% respectively; the contributions of land cover change were -10.94%, -140.26% and 27.44% respectively, indicating that the land cover change began to have greater effect on the ecosystem services after 2000.

Key Words: ecosystem services; ecosystem quality; InVEST model; NDVI; the Tibetan Plateau

土地覆盖/利用变化是生态系统服务变化的重要驱动力,其对生态系统服务的影响受到越来越多的关注^[1-3]。然而在气候变化和人类活动加剧的背景下,生态系统质量变化对生态系统服务的影响更应该引起重视。相比生态系统质量变化,生态系统类型的变化(或土地覆盖/利用变化)是显性的,容易引起察觉和重视;而生态系统质量的变化是隐性的、渐进的,不易察觉,并且涉及范围更广,从而可能对生态系统稳定性、生态系统功能和生态系统服务产生更大影响。此外,生态系统质量的变化累积到一定程度也可能会引起生态系统类型的变化,如科尔沁沙地就是由于几十年来不当的人为活动由草原生态系统退化而形成^[4-5]。然而目前国内外对生态系统服务的评估大多是基于土地覆盖/利用变化进行的^[6-8],较少关注生态系统质量变化对生态系统服务的影响。归一化植被指数(NDVI)可以有效反映植被生长状况,与植被群落的盖度、生物量的富集程度、生产力等均有较好的相关性,已被广泛应用于对生态系统质量的评估中^[9-11]。目前已有研究尝试将 NDVI 作为生态系统服务价值当量的修正因子来评估某些生态系统服务价值的变化^[12-13]。

青藏高原作为我国“两屏三带”生态安全格局中的重要生态安全屏障,其特有的气候、地理条件决定了其生态系统具有脆弱性和敏感性^[14]。研究表明,青藏高原是对气候变化最为敏感的地区之一^[15],其升温速度几乎是全球平均升温速度的 3 倍^[16-18],且气候变化已对青藏高原的草原生态系统产生显著影响^[19-21]。拉萨河流域位于青藏高原东南部雅鲁藏布江中游,人口、农业分布较为集中,拉萨市就位于拉萨河流域的下游。1990—2014 年拉萨河流域总人口从 75.87 万增加至 109.37 万,而 GDP 增长了近 47 倍。根据拉萨河流域及周边气象站点近 60 年的气象数据统计,流域流域平均每年温度增加 0.047℃,远高于青藏高原的平均年升温速度 0.03℃^[16-18];降雨量呈先增加后减少的趋势,且具有较大的空间差异性。拉萨河流域的生态系统服务不仅与中下游居民的福祉和流域可持续发展息息相关^[22],而且对维持流域及整个青藏高原的生态安全具有重要

意义。本研究选择 NDVI 作为生态系统质量变化的指示因子,在分析拉萨河流域 1990—2015 年的生态系统类型和质量变化的基础上,利用 NDVI 对 InVEST 模型中与植被状况相关的参数进行计算与修正,对拉萨河流域 1990 至 2015 年水土保持、水源涵养和固碳 3 种生态系统服务进行评估,进而探讨生态系统类型和质量变化对流域生态系统服务能力的影响,以期对拉萨河流域及青藏高原的生态系统保护与管理决策提供科学依据。

1 研究区概况

拉萨河为雅鲁藏布江中游左岸的一级支流,是拉萨市、林周县和当雄县等市(县)的主要水源地。拉萨河流域西部和北部以念青唐古拉山为界,东南部与雅鲁藏布江流域相邻,流域范围北纬 29°20′—31°15′,东经 90°05′—93°20′,流域面积约为 3.26 万 km²,包括拉萨市市城关区、曲水县、达孜县、堆龙德庆县、当雄县、林周县、墨竹工卡县、嘉黎县及那曲县的部分区域。流域内地貌分为河源区、高山盆地区 and 河谷区 3 个地貌分区,海拔在 3598—7074 m 之间。流域气候属于高原温带—寒温带半干旱季风气候,年降水量为 340—700 mm,年平均气温为 -7.1—9.2℃,流域内的生态系统类型以高山草甸和高寒草原为主^[23]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

生态系统类型数据(30 m)和 NDVI 数据(250 m)来自中国科学院遥感与数字地球研究所;气象数据来自中国气象局气象中心;DEM 数据(30 m)来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>);土壤数据来自基于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn>);月参考蒸散发数据来自 CGIAR CSI dataset(<http://www.cgiar-csi.org/data>)。

2.2 生态系统服务评估方法

2.2.1 水土保持

本研究采用 InVEST(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs)模型 v3.3.0 版本进行生态系统服务评估。水土保持服务采用 InVEST 模型中的 Sediment Delivery Ratio(SDR)模块计算。模型中主要参数包括:(1)土壤可蚀性因子 K,由基于土壤粒径组成与土壤有机碳含量的 EPIC 模型计算得到,并根据相关研究进行校正^[24];(2)降雨侵蚀力因子 R,采用 Wischmeier 和 Smith 提出的月尺度公式计算^[25];(3)水土保持措施因子 P,结合研究区的实际情况并参考相关文献得到^[26-28];(4)植被覆盖和经营管理因子 C,非植被生态系统类型的 C 值由查阅相关文献得到^[26,29],各植被类型的 C 值根据其当年的植被覆盖度 f 计算^[23],f 由各植被类型当年的生长季 NDVI 均值计算得到。

2.2.2 水源涵养

水源涵养服务采用 InVEST 模型中的 Seasonal Water Yield(SWY)模块计算。相比于 InVEST 模型中的 Water Yield 模块,SWY 模块将产水量分为了地表快速产流量(Quick flow)和水源涵养量/基流量(Baseflow),并采用月尺度数据,从而能更准确的评估流域的水源涵养能力,尤其是针对季节性气候较强的区域。模型中主要参数包括:(1)月均降雨量与月均降雨次数;(2)月参考蒸散发量;(3)土壤水文分类,根据 Harmonized World Soil Database(HWSD)中对土壤质地的分类,并按照 Soil Conservation Service(SCS)模型中的土壤水文分类方法进行分类^[30];(4)各植被类型的月作物系数,由叶面积指数 LAI 通过以下公式计算得到:

$$K_c = \begin{cases} \frac{LAI}{3}, LAI \leq 3 \\ 1, LAI > 3 \end{cases}$$

式中,各植被类型的叶面积指数 LAI 参考孙鹏森等^[31]在岷江上游的研究结果,由各植被类型的 NDVI 计算得到。非植被生态系统类型的作物系数参考 InVEST 模型说明手册以及相关文献进行赋值^[32];(5)径流曲线数

CN 值,参考 InVEST 模型说明手册和相关文献^[33],对不同土壤类型和生态系统类型的 CN 值赋值,然后以 1990 年各植被类型的 CN 值为基准,根据植被覆盖度对其他年份各植被类型的 CN 值进行修正^[34]。

2.2.3 固碳

采用 InVEST 模型中的 Carbon Storage and Sequestration (CSS) 模块计算。模型以生态系统类型为评估单元,将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳以及死亡有机碳。其中,地上生物碳密度根据各植被类型的 NDVI 计算出生物量,然后乘以碳含量系数得到^[35]:

$$\text{BIOMASS} = 113.0 \cdot \text{NDVI} - 17.4 \quad (R^2 = 0.648, P < 0.001)$$

式中, BIOMASS 为生物量 (t/hm^2)。地下生物量根据文献中的根茎比进行折算然后再乘以碳含量系数得到^[35-36];土壤碳密度和死亡有机碳密度由于相对稳定,各年份均采用文献中西藏地区的参数^[35,37]。

3 结果与分析

3.1 生态系统类型变化

根据青藏高原相关研究^[38-40]并拉萨河流域实际情况,将拉萨河流域生态系统类型划分为森林、灌木、草甸、草原、稀疏草原、农田、裸地、人工表面、湿地和冰川/积雪共 10 类。通过 ArcGIS 软件进行统计得到 1990—2015 年拉萨河流域不同生态系统类型面积变化图(图 1)。从变化面积和结构来看,减少最多的是稀疏草原和冰川/积雪,面积分别减少了 249.63 km^2 和 86.31 km^2 ,占流域总面积的 0.75% 和 0.26%;增加最多的是草甸和草原,分别增加了 120.09 km^2 和 88.43 km^2 ,占流域总面积的 0.36% 和 0.27%,其他生态系统类型变化较小;且变化主要发生在 2010—2015 年。从变化速度来看,1990—2015 年人工表面、湿地和森林面积增长较快,增幅分别为 82.65%、32.40%、9.45%,冰川/积雪、农田和稀疏草原面积缩减较快,减幅分别为 10.15%、4.75%、2.99%,其他生态系统类型变化较小。从土地类型转化方向来看,主要变化为稀疏草原转化为草甸和草原、农田转化为人工表面、草原和稀疏草原转化为湿地、冰川/积雪转化为稀疏草原和裸地等。

3.2 生态系统质量变化

根据各植被类型生长季(6—10 月)NDVI 均值统计(图 2),1990—2000 年间,拉萨河流域森林、灌木、草甸和草原等植被类型的 NDVI 显著上升,增幅分别为 40.20%、17.47%、22.12%、22.75%;2000—2010 年间,森林、灌木和草甸 NDVI 分别降低了 10.97%、3.92%、3.52%,而稀疏草原上升了 5.67%;2010—2015 年间,森林 NDVI 增加了 7.10%,而稀疏草原、草原和草甸分别减少了 6.66%、5.16%和 4.11%。总的来看,1990—2000 年各植被生态系统类型质量显著上升,平均增幅达 24.69%,而 2000 年后草甸和草原生态系统质量逐渐降低,呈退化趋势。

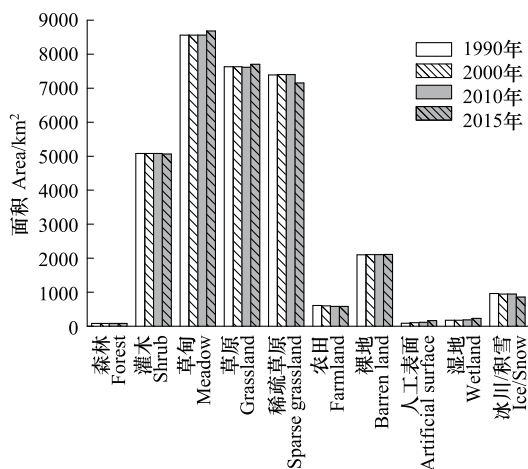


图 1 1990—2015 年各生态系统类型面积

Fig.1 Area of different ecosystems from 1990 to 2015

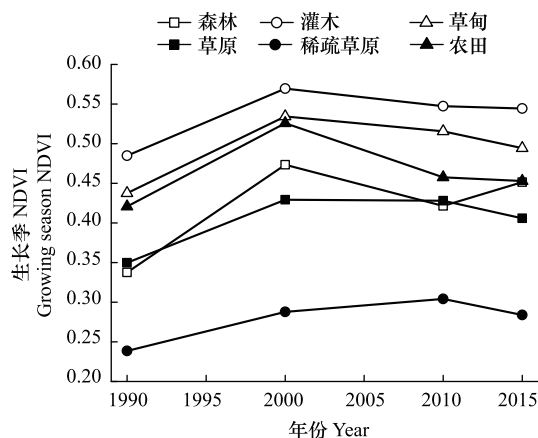


图 2 1990—2015 年各植被类型生长季 NDVI 变化

Fig.2 Growing season NDVI of different vegetation from 1990 to 2015

3.3 生态系统服务变化

3.3.1 土壤保持

拉萨河流域生态系统土壤保持服务主要分布在中下游河谷两侧,1990—2015 年间其空间分布格局未发生显著变化(图 3a)。统计结果显示(图 4a),1990—2015 年拉萨河流域土壤保持总量增加了 3.97%;其中 1990—2000 年间增加了 4.63%,2000—2015 年略有下降。从各植被类型单位面积土壤保持量(图 4d)来看,由于 NDVI 上升,1990—2000 年灌木、草甸、草原、稀疏草原等的单位面积土壤保持量也明显增加;2000—2015 年,灌木和森林的单位面积土壤保持量继续增加,而草甸和草原分别降低了 4.13% 和 1.00%。森林的单位面积土壤保持量较低是因为森林多位于坡度较高的地方,且植被覆盖度较低,导致其土壤较易流失。

3.3.2 水源涵养

拉萨河流域生态系统水源涵养服务主要分布在流域中上游以及念青唐古拉山地区(图 3b)。统计结果显示(图 4b),1990 年到 2015 年拉萨河流域水源涵养总量下降了 23.04%;其中,1990—2000 年下降幅度较大,2000—2015 年变化相对较小。各植被覆盖类型单位面积水源涵养量变化如图 4e 所示。由于拉萨河流域气候干燥、日照强烈,因此模型计算出的各生态系统类型的单位面积水源涵养量也与其蒸散能力密切相关。由于 NDVI 上升,1990—2000 年灌木、草原、稀疏草原等的水源涵养能力明显降低;而 2000—2015 年变化相对较小。另外,裸地的单位面积水源涵养量最高,原因是其蒸散系数偏小,且位于降雨量偏多的上游地区;森林的单位面积水源涵养量最低,原因是其蒸散系数较大,又位于降雨量较少的下游地区,且植被覆盖度较低。

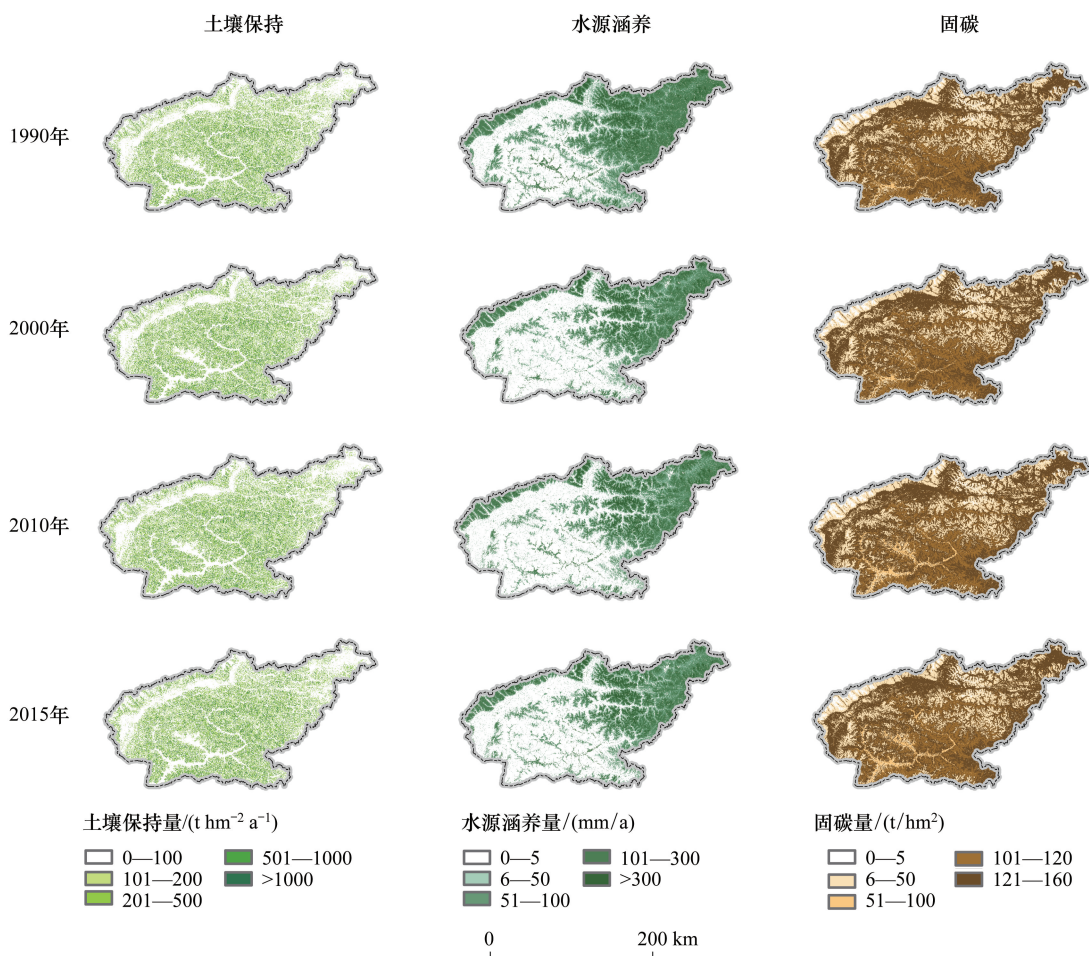


图 3 1990—2015 年拉萨河流域各项生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services in Lhasa River Basin from 1990 to 2015

3.3.3 固碳

拉萨河流域生态系统固碳服务主要分布在流域东南部以及上游和念青唐古拉山南部的河谷地区(图3c)。统计结果显示(图4c),1990—2015年拉萨河流域固碳总量增加了9.12%;其中1990—2000年增加了12.05%,2000—2015年变化相对较小。各植被覆盖类型单位面积固碳量变化如图4f所示,1990—2000年各植被类型的单位面积固碳量均显著增加,而2000—2015年草甸和草原的单位面积固碳量明显下降,分别降低了4.24%、3.45%。由于草甸和草原是拉萨河流域的主要生态系统类型,2015年其固碳量之和占流域总固碳量的71.10%,表明以草甸和草原为主的草地生态系统是拉萨河流域的主要碳汇,因此其固碳能力的降低对流域的总固碳量具有较大影响。

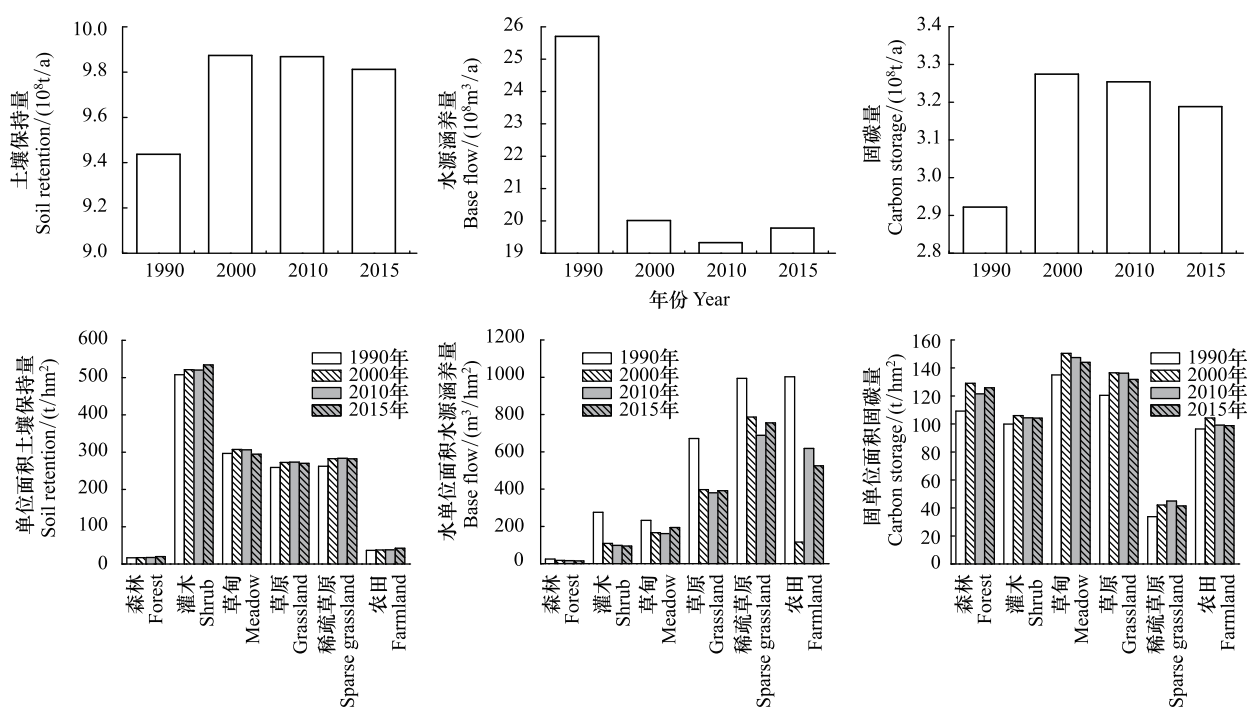


图4 1990—2015年生态系统服务总量及各植被类型生态系统服务能力变化
Fig.4 Ecosystem services changes of total quantity and of different vegetation from 1990 to 2015

3.4 生态系统类型和质量变化对生态系统服务的影响分析

1990—2000年,流域生态系统类型变化较小,而生态系统质量变化相对较大,因此各项生态系统服务能力的变化主要是由于生态系统质量的变化导致;2000—2015年,生态系统类型和质量都发生了较显著的变化,对流域总体生态系统服务产生了复杂交错的影响。为具体阐明生态系统类型和质量变化各自对生态系统服务的影响,根据流域生态系统变化的阶段性特征,在1990—2000年和2000—2015年两个时段内,分别假设生态系统质量不变而只改变生态系统类型和生态系统类型不变而只改变生态系统质量两种情景,将模型计算得到的各项生态服务变化量与实际变化量对比分析,得到生态系统类型和质量变化各自对实际生态系统服务变化的贡献率(表1)。

从结果可以看出,1990—2000年,生态系统质量变化对土壤保持和固碳量变化的贡献率分别为100.22%和99.99%,表明生态系统质量变化是其增加的主要原因;1990—2000年,生态系统质量变化对水源涵养变化的贡献率为-99.78%,表明生态系统质量变化是其降低的主要原因。2000—2015年,生态系统质量变化对土壤保持和固碳量变化的贡献率分别为-89.28%和-126.12%,而生态系统类型变化对其的贡献率分别为-10.94%和27.44%,表明生态系统质量变化是土壤保持和固碳量降低的主要原因,而生态系统类型的变化本应导致固碳量增加;2000—2015年,生态系统类型变化对水源涵养变化的贡献率为-140.26%,而生态系统质量变

化对其的贡献率为 40.21%,表明生态系统类型变化是其降低的主要原因,而生态系统质量的变化本应导致其增加。

表 1 生态系统类型和质量变化对生态系统服务的贡献率/%
Table 1 Relative contributions of ecosystem type change and ecosystem quality change

生态系统服务 Ecosystem service	1990—2000 年		2000—2015 年	
	生态系统类型 变化贡献率	生态系统质量 变化贡献率	生态系统类型 变化贡献率	生态系统质量 变化贡献率
	Contribution of ecosystem type changes	Contribution of ecosystem quality changes	Contribution of ecosystem type changes	Contribution of ecosystem quality changes
土壤保持 Soil retention	-0.31	100.22	-10.94	-89.28
水源涵养 Base flow	-0.41	-99.78	-140.26	40.21
固碳 Carbon storage	0.01	99.99	27.44	-126.12

“-”表示其贡献为负向,即其变化导致生态系统服务能力降低;由于模型计算原理较复杂且存在统计误差,因此生态系统类型与生态系统质量变化贡献率之和并不完全等于 100%

4 讨论与结论

生态系统类型(或土地利用变化)及气候变化对生态系统服务的影响已得到广泛关注,如 Pan Tao 等^[38]研究了土地利用变化和气候变化分别对黄河源区产水量变化的贡献率,Su Changhong 等^[7]研究了土地利用变化和气候变化与黄土高原三项生态系统服务变化的相关性。然而目前大多数研究只考虑了气候变化中的降雨和温度变化,并没有考虑气候变化所引起的植被质量的变化^[20,41]对生态系统服务的影响。在气候变化和过度放牧等人类活动的干扰下,1990—2015 年拉萨河流域不仅生态系统类型的的面积和分布格局发生了变化,其生态系统质量更是发生了显著的改变。生态系统类型面积和分布格局的变化对各项生态系统服务的影响是直接的、显而易见的,而质量变化对其的影响与各项复杂的生态过程紧密相关。生态系统质量的变化主要体现在植被状况的变化上,植被通过光合、呼吸、蒸散等作用联结着大气、水和土壤等不同圈层,对区域的物质和能量循环具有重要影响^[42]。本研究选择 NDVI 作为生态系统质量变化的指示因子,通过植被覆盖和经营管理因子、作物系数、径流曲线数、碳密度等参数,间接地建立了 NDVI 与各项生态系统服务的关联关系,并通过情景分析方法,阐明了生态系统质量变化对生态系统服务的重要影响。

研究结果表明,1990—2000 年拉萨河流域生态服务变化显著,主要由生态系统质量变化导致,即 NDVI 的上升导致其土壤保持和固碳服务显著增加,水源涵养服务显著降低;而 2000—2015 年拉萨河流域生态系统服务变化相对较小,生态系统类型变化对生态系统服务变化的贡献有所加大。随着社会经济的发展和气候变化加剧,拉萨河流域所面临的生态环境压力也将继续增加。根据本研究结果,针对流域生态系统保护与管理提出以下建议:关注流域气候和生态系统质量变化,加强对流域生态系统的遥感和定位监测以及野外调查,尤其是加强对冰川与湿地动态变化的监测,并深入开展相关研究;加强对草甸和草原的保护与管理,对退化严重的地区,开展退化机制和原因的研究,采取针对性措施加强草甸和草原的保护和恢复;拉萨河流域气候干燥,植被蒸散量较大,在进行植被恢复与保护时应合理选择植被类型和植物种类,权衡水源涵养和其他各项生态系统服务之间的关系;合理规划布局城镇建设用地,协调社会经济发展如矿产资源开采、放牧、旅游业等与生态环境保护的关系,最大限度减轻人类活动对高原生态系统的干扰。

参考文献 (References):

[1] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of minnesota. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.

[2] Nelson E, Sander H, Hawthorne P, Conte M, Ennaanay D, Wolny S, Manson S, Polasky S. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models. PLoS One, 2010, 5(12): e14327.

- [3] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 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. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [4] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 胡孟春, 赵爱国. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-528.
- [5] 赵哈林, 大黑俊哉, 周瑞莲, 李玉霖, 左小安, 黄刚. 人类活动与气候变化对科尔沁沙质草地植被的影响. 地球科学进展, 2008, 23(4): 408-414.
- [6] 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. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [7] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 119-128.
- [8] 支再兴, 李占斌, 于坤霞, 李鹏, 高海东, 姚京威. 陕北地区土地利用变化对生态服务功能价值的影响. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 23-30.
- [9] 梁变变, 石培基, 王伟, 唐笑, 周文霞, 敬烨. 基于 RS 和 GIS 的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价——以石羊河流域为例. 应用生态学报, 2017, 28(1): 199-209.
- [10] 王坤, 周伟奇, 李伟峰. 城市化过程中北京市人口时空演变对生态系统质量的影响. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2137-2144.
- [11] Fu X, Ma M F, Jiang P, Quan Y. Spatiotemporal vegetation dynamics and their influence factors at a large coal-fired power plant in Xilinhot, Inner Mongolia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24(5): 433-438.
- [12] 杨依天, 张月丛. 基于 NDVI 修正系数的和田绿洲生态系统服务价值估算. 河北民族师范学院学报, 2016, 36(1): 108-117.
- [13] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [14] 钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 李辉霞, 周伟, 李祥妹. 青藏高原生态安全研究. 山地学报, 2010, 28(1): 1-10.
- [15] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [16] Qiu J. China: the third pole. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [17] Kang S C, Xu Y W, You Q L, Flügel W A, Pepin N, Yao T D. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 015101.
- [18] Xu Z X, Gong T L, Li J Y. Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau-regional temperature and precipitation. *Hydrological Processes*, 2008, 22(16): 3056-3065.
- [19] Tao J, Zhang Y J, Dong J W, Fu Y, Zhu J T, Zhang G L, Jiang Y B, Tian L, Zhang X Z, Zhang T, Xi Y. Elevation-dependent relationships between climate change and grassland vegetation variation across the Qinghai-Xizang Plateau. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1638-1647.
- [20] Pan T, Zou X T, Liu Y J, Wu S H, He G M. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 307-317.
- [21] Wang P, Lassoie J P, Morreale S J, Dong S K. A critical review of socioeconomic and natural factors in ecological degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 1-9.
- [22] Yan Y, Zhao C L, Quan Y, Lu H T, Rong Y, Wu G. Interrelations of ecosystem services and rural population wellbeing in an ecologically-fragile area in north China. *Sustainability*, 2017, 9(5): 709.
- [23] 方广玲, 香宝, 赵卫, 谢强, 刁兆岩, 迟文峰. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
- [24] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [25] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation Planning. Washington DC: Government Printing Office, 1965.
- [26] 李婷, 刘康, 胡胜, 包玉斌. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [27] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 张昌顺, 范娜, 张彩霞, 李士美. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2249-2256.
- [28] 袁志芬. 基于 InVEST 模型的四川省宝兴县生态系统服务功能动态评估[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [29] 张海波. 南方丘陵山地带水源涵养与土壤保持功能变化及其区域生态环境响应[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- [30] Mishra S K, Singh V P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. Dordrecht: Springer, 2003.
- [31] 孙鹏森, 刘世荣, 刘京涛, 李崇巍, 林勇, 江洪. 利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据估算叶面积指数(LAI)——以岷江上游为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [32] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop water Requirements-FAO Irrigation and

Drainage Paper 56. Rome; FAO, 1998.

- [33] 周翠宁, 任树梅, 闫美俊. 曲线数值法(SCS 模型)在北京温榆河流域降雨-径流关系中的应用研究. 农业工程学报, 2008, 24(3): 87-90.
- [34] NRCS-USDA. National Engineering Handbook. United States; United States Department of Agriculture, 2007.
- [35] 赵忠贺, 徐增让, 成升魁, 鲁春霞, 刘高焕. 西藏生态系统碳蓄积动态的土地利用/覆被变化归因分析. 自然资源学报, 2016, 31(5): 755-766.
- [36] 王建林, 常天军, 李鹏, 成海宏, 方华丽. 西藏草地生态系统植被碳贮量及其空间分布格局. 生态学报, 2009, 29(2): 931-938.
- [37] 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.
- [38] Pan T, Wu S H, Liu Y J. Relative contributions of land use and climate change to water supply variations over Yellow River Source Area in Tibetan Plateau during the past three decades. PLoS One, 2015, 10(4): e0123793.
- [39] Jiang C, Li D Q, Wang D W, Zhang L B. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change. Ecological Indicators, 2016, 66: 199-211.
- [40] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, Liu Y, Rossel R A V, Chappell A, Yu W, Shi Z. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. Science of the Total Environment, 2018, 635: 673-686.
- [41] Liu P L, Hao L, Pan C, Zhou D C, Liu Y Q, Sun G. Combined effects of climate and land management on watershed vegetation dynamics in an arid environment. Science of the Total Environment, 2017, 589: 73-88.
- [42] 肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路. 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. 生态学报, 2016, 36(19): 6019-6030.