

DOI: 10.5846/stxb201811292598

钱大文, 曹广民, 杜岩功, 李 茜, 郭小伟. 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(4): 1392–1404.

Qian D W, Cao G M, Du Y G, Li Q, Guo X W. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1392–1404.

2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化

钱大文*, 曹广民, 杜岩功, 李 茜, 郭小伟

中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008

摘要: 祁连山是我国西部重要的生态安全屏障和生物多样性保护优先区域, 其中南坡地区是水源涵养服务核心区, 但目前对该区域生态系统服务时空分布及动态变化仍缺乏深入认识。利用遥感技术和生态系统服务理论, 综合多源数据产品, 借鉴生态系统服务计算方法, 对包括土壤保持等 7 个生态系统服务类型展开功能及价值核算, 对祁连山南坡土壤保持等 7 个生态系统服务类型 2000—2015 年间的时空分异及动态展开监测和评估, 研究表明: (1) 近 16 年来祁连山南坡生态系统服务平均单位面积价值为 76.27 万元/km², 总价值为 658.74 亿元, 且调节气候、水源涵养和调节空气质量服务构成了研究区生态系统服务的主体。(2) 高寒草甸和高寒草原的生态系统服务总价值最高, 而森林和灌丛的单位面积服务价值最高; 天峻县和祁连县的生态系统服务总价值最高, 而海晏县和刚察县的单位面积服务价值最高。(3) 近 16 年来祁连山南坡生态系统服务价值呈增长趋势, 其中调节气候和调节空气质量服务价值的增速最快, 且增长区域主要集中在研究区北部祁连县和天峻县境内。(4) 研究区东部山区、南部环湖区以及中部湿地区能够提供多项复合生态服务功能, 应作为生态保护和管理的重点。研究结果能为祁连山生态红线制定及国家公园建设提供理论依据和技术支撑。

关键词: 祁连山; 生态系统服务; 生态功能分区; 遥感监测

Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

QIAN Dawen*, CAO Guangmin, DU Yangong, LI Qian, GUO Xiaowei

Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science; Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in Qinghai Province, Xining 810008, China

Abstract: Qilian Mountains are important ecological security barrier and priority area for biodiversity protection in western China, of which the southern slope area is the core area for water conservation services. However, at present, there is still a lack of in-depth understanding of the temporal and spatial distribution and dynamic changes of ecosystem services in this region. This paper used remote sensing technology and ecosystem service theory, and integrated multi-source data products and ecosystem service calculation methods to monitor and evaluate the spatio-temporal variation and dynamics of the values of seven ecosystem service types in the southern slope of Qilian Mountains (SSQM). The results showed that (1) in the past 16 years, the average unit area value of ecosystem service on the SSQM was 762700 yuan/km², with a total value of 65.87 billion yuan. The climate regulation, water conservation, and air quality regulation services were the dominant service types. (2) The alpine meadow and alpine steppe had the largest total ecosystem service value (ESV), while forest and shrubland had the largest service value per unit area. Within the study area, the total ESV of Tianjun County and Qilian County was the largest, while the unit area value in Haiyan County and Gangcha County was the largest. (3) In the past 16 years, the ESV on the southern slope of Qilian Mountains has shown an increasing trend, of which the service value of

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41730752); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目; 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)

收稿日期: 2018-11-29; **网络出版日期:** 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwqian@nwipb.cas.cn

climate regulation and air quality regulation had the fastest growth rate. The growth areas were mainly concentrated in Qilian County and Tianjun County in the northern part of the research area. (4) The mountain area in the east, the Qinghai lake belt in the south and the wetland area in the center can provide multiple composite ecological service functions and should be taken as the focus of the ecological protection and management. The results can provide the theoretical basis and technical support for establishment of Qilian mountain ecological red line and the construction of national parks.

Key Words: Qilian Mountain; ecosystem service; ecological function partition; remote sensing monitoring

生态系统服务是人类从生态系统获得的收益,这些收益包括可以直接影响人类生活的供给服务、调节服务和文化服务,以及维持其他服务所必须的支持服务^[1]。1997 年, Daily 和 Costanza 等的研究引起了对于生态系统服务的广泛关注和研究,而 MA(Millennium Assessment)在 2005 年的报告则使全球范围的生态系统服务价值评估研究成为热点^[1-4]。在全球气候变化和人类活动的双重影响下,陆地生态系统的结构及过程发生了剧烈变化,致使生态系统服务功能受到损害和削弱^[4-5],而对生态系统服务功能及其价值的量化评估,能够为决策者制定生态保护规划与管理制度提供可靠参考和依据,进而促进人地和谐和可持续发展^[6-8]。

目前生态系统服务价值估算方法主要包括基于土地利用/覆被数据的面积当量法、遥感定量法以及模型综合法。Costanza 等^[3]率先利用土地利用/覆盖数据和生态系统服务当量,核算了全球生态系统服务价值,谢高地等^[9]基于实际情况对当量系数进行修改,提出了中国生态系统服务当量表,并计算了中国生态系统服务价值。目前国内外研究主要基于这两个研究提出的当量系数,并针对当地情况进行因地制宜的修改^[10-12]。此外,许多研究关注城市、热带雨林、山区等生态系统变化剧烈或敏感地区,土地利用/覆盖变化对生态系统服务价值的影响^[13-15]。利用遥感手段和生态学方法,建立生态系统服务价值生态遥感定量计算模型,能够考虑生态系统质量的时空分异,使结果更加真实可信,进而为生态系统服务管理提供直观可视化的、定量的评价结果^[16-17]。例如何浩等^[17]和姜立鹏等^[18]利用生态遥感参数,分别对中国陆地生态系统和草地生态系统服务价值进行测算,王爱玲等^[19]、许旭等^[20]和亢红霞等^[21]则对不同区域尺度的生态系统服务价值进行估算。Pettorelli 等^[22]系统总结了能够用于开展生态系统服务功能监测的遥感数据集,其认为遥感数据在包括全球生物多样性监测和生态保护等多个重要议题方面具有巨大潜力。Stritih 等^[23]基于贝叶斯网络讨论了遥感数据等在生态系统服务评价中的不确定性问题。Paruelo 等^[24]基于 NDVI 数据提出了 ES provision index,用于计算南美洲典型生态区的碳储存、水源涵养和生物多样性服务。模型综合法通过利用 InVEST、ARIES、Sol VES 等模型^[25],综合地面调查、多源数据融合和 GIS 技术,对生态系统服务功能及价值进行定量评估。其中 InVEST 模型的应用最广泛,全球各地学者在不同生态系统类型背景下开展案例研究^[26]。

祁连山位于青藏高原东北缘,青海省和甘肃省交界,是我国西北干旱区的水源涵养功能区和国家重点生态功能区之一,其环境保护和稳定性的维持,对青海、甘肃和内蒙古三大省区数百万人的生态安全具有至关重要的作用^[27]。随着祁连山国家公园的成立,祁连山生态环境保护进入一个新的阶段,其重要性不言而喻。因此,可以说祁连山南坡是整个祁连山地区水源涵养的核心区^[28]。随着全球气候变化和人类活动的影响,本区出现了一系列的生态环境问题,包括冰川退缩、草地退化、水源涵养功能降低和水土流失加剧等^[27,29-30]。然而目前对于该地区的生态系统服务研究主要关注单一生态系统类型或局部地区^[31-34],缺乏包括所有生态系统及其服务类型的评估。尤其是对于祁连山南坡地区生态系统服务空间分布状况及其多年动态缺乏认识,导致区域生态系统管理缺少理论依据指导。

因此,本研究基于以下两个科学问题:(1)祁连山南坡地区生态系统服务时空分布及动态变化?(2)基于生态系统服务价值的生态功能空间分类?通过 3S 技术,对祁连山南坡地区多年生态系统服务价值展开动态监测和估算,研究结果可为摸清区域生态资产家底,制定生态红线和生态区划,以及实现祁连山“山水林田湖草”整体保护,筑牢国家生态安全屏障,推动形成人与自然和谐共生新格局提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况

祁连山南坡指位于青海省境内的祁连山南麓地区,包括门源回族自治县、海晏县、刚察县、天峻县、祁连县和德令哈市,海拔约为 1142—5814 m,总面积约 86368 km²(图 1)。区内分布冰川、森林、灌丛、高寒草甸和湿地,是周边地区多条河流的发源地:包括河西走廊的石羊河、黑河、疏勒河,青海湖流域的布哈河、以及黄河流域的大通河和湟水。研究区属于典型高原大陆性气候,年均温 -5.9℃,年降水量 400 mm 左右,主要集中在 5—9 月。研究区内地形起伏较大,主要山脉均为西北—东南走向,其间分布山间谷地。受地形影响,降水和气温的垂直变化显著,且复杂的地貌和气候变化使得区内植被类型多样^[28,35]。

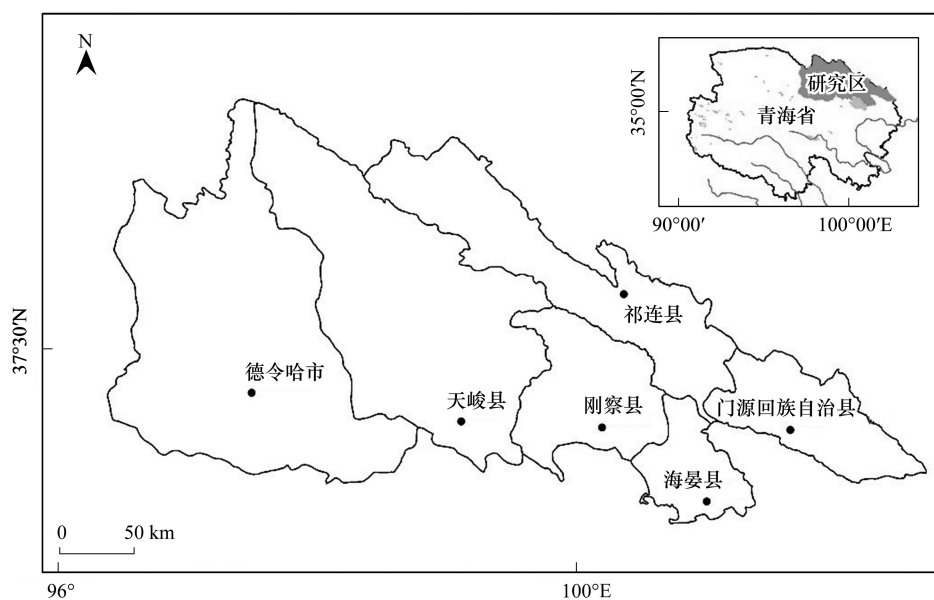


图 1 研究区示意图

Fig.1 The location map of the Southern Slope of Qilian Mountain

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 遥感数据

选取 2000—2015 年的 MODIS NDVI 产品 MOD13Q1^[36] 和 NPP 产品 MOD17A3H^[37],其时间分辨率分别为 16 d 和 1 a,空间分辨率分别为 250 m 和 500 m。所有数据均来自美国 LP DAAC (Land Process Distributed Active Archive Center) (<https://lpdaac.usgs.gov>)。利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件对 MODIS 原始数据进行镶嵌、转投影及重采样等预处理,并选取生长季数据进行最大值合成^[38] (MVC, Maximum Value Composites),最终得到逐年的 NDVI 数据。

2.1.2 降水和土壤数据

基于中国区域地面气象要素数据集^[39-40] (青藏高原科学数据中心, <http://www.tpdatabase.cn>) 提取祁连山南坡 2000—2015 年月降水量数据,计算土壤保持服务和水源涵养服务,其空间分辨率为 10 km。基于世界土壤数据库 (HWSD)^[41] 提取研究区土壤属性空间数据 (寒区旱区科学数据中心, <http://westdc.westgis.ac.cn/>),用以计算土壤保持服务,空间分辨率为 1 km。

2.1.3 其他数据

其他数据主要指研究区土地覆被,其被用作多个生态系统服务计算的辅助数据。利用下载自 USGS 网站

(<http://glovis.usgs.gov>) 的 Landsat OLI(2015 年)数据,经过大气校正、几何纠正、波段合成等预处理后,基于面向对象分类和人机交互解译结合的方法,并参考“基于碳收支的全国土地覆被分类系统”,将研究区分为高寒草甸、草原、草本湿地、水域、耕地、荒漠草原、森林和灌丛共 8 种类型,进行土地覆被信息提取。最后利用野外和高分辨率影像验证点对结果进行精度评价,结果显示总体精度达到 92% 以上, Kappa 系数为 0.88,符合研究的精度要求。此外还包括研究区行政边界、青海省祁连山自然保护区边界、DEM 数据(地理空间数据云, <http://www.gscloud.cn>)。

2.2 生态系统服务计算

2.2.1 生态系统服务分类系统

本文根据适用性和可行性的原则,参考应用最广泛的 MA 分类系统,并结合研究区特点,将祁连山南坡生态系统服务功能分为调节服务功能、供给服务功能和支持服务功能 3 大类,包括土壤保持、水源涵养、调节气候、调节空气质量、畜牧产品、生产有机物质和营养物质循环等 7 个子类。

2.2.2 生态系统服务价值核算

选取 7 项计算生态系统服务功能模型,利用市场价值法等进行服务价值的量化,为了便于比较,所有价值均采用 2010 年物价(表 1)。土壤保持功能量的详细计算流程见相关文献^[42-45],其价值量包括减少土地废弃

表 1 生态系统服务评估指标及其参数

Table 1 Ecosystem service evaluation indicators and their parameters

生态系统服务 Ecosystem service	评估模型 Evaluation model	参数 Parameter	物质量评估方法 Quantity evaluation method	价值量评估方法 Value evaluation method
土壤保持 Soil conservation	$SC = Ap - Ar$	SC 为土壤保持量(t/hm^2), Ap 和 Ar 分别为土壤潜在侵蚀量和实际侵蚀量,其中 Ap 指在地表裸露且没有任何水保措施下的土壤侵蚀量(t/hm^2), Ar 则指地表有植被覆盖,以及采取一定的水土保持措施下的土壤侵蚀量(t/hm^2)	RUSLE 模型 ^[42-45]	固土+保肥+淤积 ^[46]
水源涵养 Water retention	$Q = A \times J_0 \times K \times (R_0 - R_g)$	Q 为与裸地相比,生态系统截留降水、涵养水分增加量(m^3); A 为生态系统类型面积; J_0 为年降水量; K 为研究区产流降水占降水总量的比例,北方统一取 0.4; R_0 为产流降水条件下裸地降水径流率; R_g 为产流降水条件下有植被覆盖的地表降水径流率	降水贮存法 ^[47-48]	水库建设成本×水源涵养量 ^[49]
调节气候 Climate regulation	$V_r = 1.63 \cdot NPP \cdot C_{碳}$	V_r 为生态系统单位面积每年吸收 CO_2 的价值(万元· km^{-2}); $NPP(x)$ 为像元 x 处单位面积每年生产的干物质质量(t/hm^2); $C_{碳}$ 为碳税率价格	NPP 为基础等量替换 ^[17, 19-20]	碳税法 ^[49]
调节空气质量 Air quality regulation	$V_s = 1.19 \cdot NPP \cdot R$	V_s 为生态系统单位面积每年释放 O_2 的价值(万元/ hm^2); R 为工业制氧价格	NPP 为基础等量替换 ^[17, 19-20]	费用替代法 ^[49]
畜牧产品 Livestock production	$Q_s = \frac{\sum A_i \times NPP \times Y_i \times R_s}{E_s \times 365 \times 0.45}$	Q_s 为草地载畜量(标准羊单位); A_i 为第 i 种草地类型适宜放牧面积; NPP 为草地净初级生产力; Y_i 为第 i 种草地类型牧草地上生物量占总生物量的比例; R_s 为牧草利用率; E_s 为绵羊日食量; 0.45 为植物以 C 形式表示的转换为植物生物量的转换系数; 365 表示羊的生长期	草地载畜量法 ^[50]	绵羊市场价格×载畜量
生产有机物质 Organic matter production	$V_p = \frac{C \times Q_1}{D \times Q_2} \times P$	V_p 为有机物质生产价值(万元/ km^2), C 为 NPP 物质质量($t \cdot C/km^2$), D 为标准煤系数(1), Q_1 为 NPP 的物质质量折合成的热量(6.7 kJ/g), Q_2 为标准煤所折合成的热量(10 kJ/g), P 为单位标准煤的价格(元/t)	标煤法 ^[21]	费用替代法 ^[46]
营养物质循环 Nutrient circulation	$V_{nc} = \sum NPP \times R_{i1} \times R_{i2} \times P_i$	i 代表氮、磷、钾三种元素; V_{nc} 是生态系统营养物质循环价值; V_{nci} 是生态系统第 i 种营养元素的累积价值(万元/ km^2); $NPP(x)$ 是像元 x 每年产生的有机物质 $g \cdot C/(km^2 \cdot a)$; R_{i1} 为 i 元素在有机物质中的比重(%); R_{i2} 是 i 元素折算成化肥的比例(%); P_i 表示 i 肥的平均价格(元/t)	营养物质 N、P 和 K 在有机物质中的分配 ^[17, 19-20]	费用替代法 ^[46]

的价值、保持土壤肥力的价值和减轻泥沙淤积的价值^[46]。水源涵养量采用降水贮存法^[47]计算,其中森林和灌丛减少径流的效益系数主要通过已有的文献资料收集得到^[47],草地的降雨径流率根据其植被覆盖度计算得到^[48]。水源涵养中的水库建设费用、调节气候中的碳税以及调节空气质量中的制氧价格,均采用《森林生态系统服务功能评估规范》中的推荐值^[49]。

畜牧产品服务利用理论载畜量代替^[50],具体计算过程首先需要确定适宜性放牧草地。根据生态保护要求、生态脆弱性、土地覆被类型等,剔除不适合和不能放牧区域,主要包括:(1)自然保护区等依法设立的保护区域;(2)坡度超过 40°的坡草地和生长旺季植被盖度低于 40%的中低覆盖度草地;(3)半裸露沙砾地、流动沙地、半固定沙地等劣地分布区;(4)水力、风力、冻融营力引起的强度、极强度和剧烈生态退化区;(5)耕地、建设用地、湖泊等非草地区^[51]。牧草利用率参考《天然草地合理载畜量计算》^[52]中的推荐值,牲畜价格和绵羊日食量则参考文献和经济统计资料确定^[53-56]。

3 研究结果

3.1 祁连山南坡生态系统服务价值及空间分异

3.1.1 2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值状况

2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务单位面积价值为 76.27 万元/km²,总价值为 658.74 亿元,其中调节气候、水源涵养和调节空气质量是研究区最主要的生态系统服务类型,其单位面积价值和总价值远远大于其他类型(表 2)。

祁连山南坡生态系统支持服务多年平均总价值为 79.80 亿元,其中营养物质循环总量为 58.82 万 t,总价值为 6.82 亿元;生产有机物质总量为 1088.84 万 t,总价值为 72.98 亿元。供给服务多年平均总价值为 14.42 亿元,全部由畜牧产品服务构成,其中适宜性草地提供的畜牧产品总量为 239.84 万只(标准羊单位),总价值为 14.42 亿元。调节服务多年平均总价值为 564.51 亿元,其中土壤保持量达到 4.73 亿 t,总价值为 32.23 亿元;水源涵养量为 31.09 亿 m³,总价值为 189.75 亿元;调节气候(固碳)总量为 484.01 万 t,总价值为 212.98 亿元;调节空气质量(释放氧气)为 1295.78 万 t,总价值为 129.55 亿元(表 2 和图 2)。

表 2 祁连山南坡 2000—2015 年平均生态系统服务物质量和价值量

Table 2 Average quality and value of ecosystem services in the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

生态系统服务类型 Ecosystem service type		单位面积物质量 Quantity per unit area/(t/km ²)	总物质量 Total quantity/万 t	单位面积价值 Value per unit area/(万元/km ²)	总价值/亿元 Total value
支持服务	营养物质循环	6.81	58.82	0.79	6.82
Supporting service	生产有机质	126.07	1088.84	8.45	72.98
供给服务	畜牧产品	27.77(只/km ²)	239.84(万只)	1.67	14.42
Provisioning service					
调节服务	土壤保持	5481.37	4.73(亿 t)	3.73	32.23
Regulating service	水源涵养	3.6(万 m ³)	31.09(亿 m ³)	21.97	189.75
	调节气候	56.04	484.01	24.66	212.98
	调节空气质量	150.03	1295.78	15.00	129.55
生态系统服务 Ecosystem service	总价值	—	—	76.27	658.74

3.1.2 生态系统服务价值空间分异

在研究区的不同生态系统类型中,高寒草甸和草原的生态系统服务总价值最高,分别达到 220.05 亿元和 149.19 亿元,随后为荒漠草原、灌丛和湿地,水域和耕地的生态系统服务价值较低。生态系统服务总价值和生态系统类型的面积有关,而单位面积价值则反映了其提供服务的能力。森林的生态系统服务单位面积价值最高,为 170.04 万元/km²,其次为灌丛、高寒草甸和草本湿地,而荒漠草原和水域的单位面积价值则较低(表

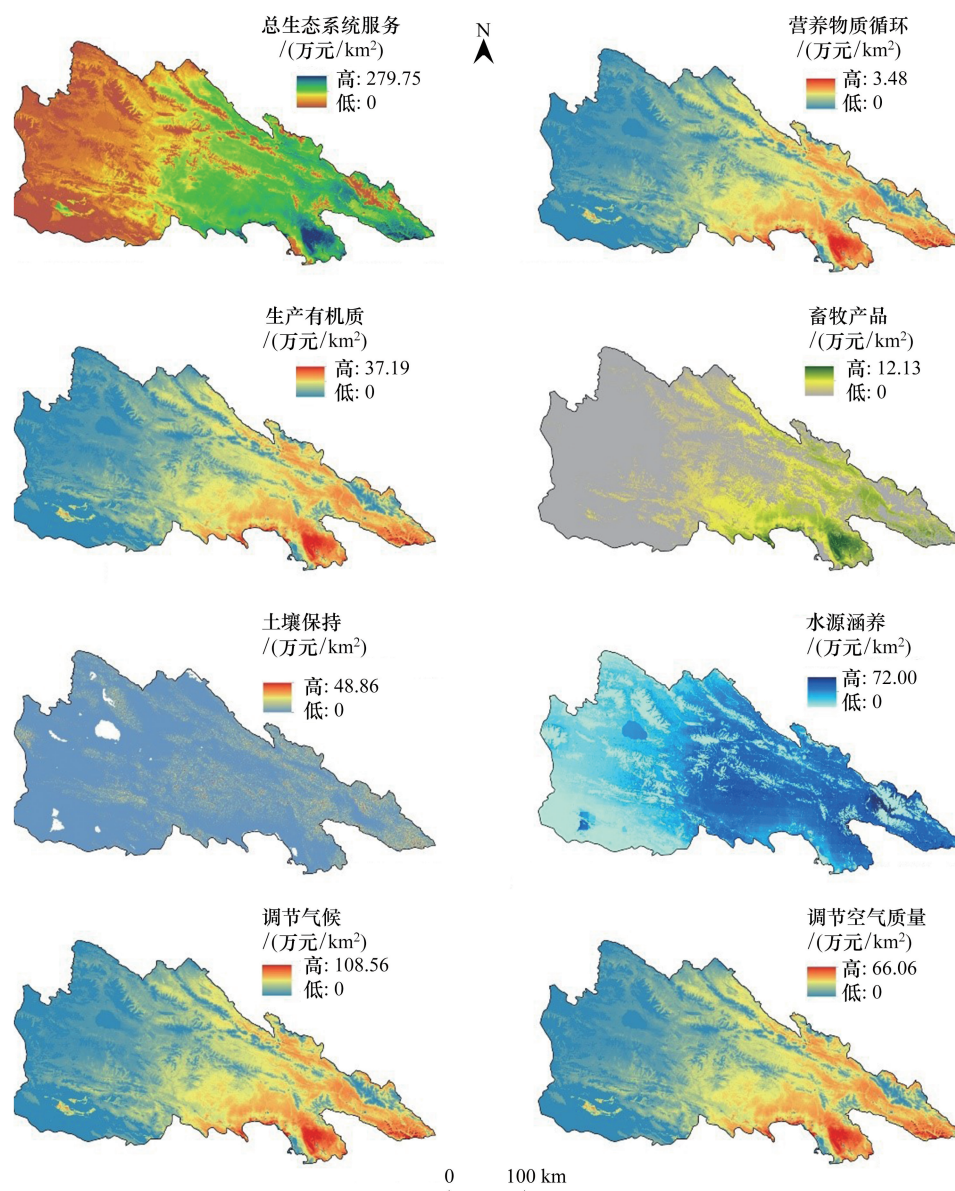


图 2 祁连山南坡 2000—2015 年平均生态系统服务单位面积价值

Fig.2 The average ecosystem service unit area value of the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

3)。从生态系统服务价值子类型看,森林、灌丛、高寒草甸和草本湿地的营养物质循环、生产有机质、调节气候和调节空气质量单位面积价值均较高。高寒草甸的单位面积畜牧产品价值和总价值均最高,分别是 4.34 万元/km² 和 7.19 亿元,其次则是草原和荒漠草原。森林和灌丛的土壤保持能力较高,其土壤保持单位面积价值分别为 12.04 万元/km² 和 8.71 万元/km²。此外,森林、灌丛、高寒草甸和草本湿地的单位面积水源涵养服务价值均较高,分别为 38.77 万元/km²、35.58 万元/km²、35.42 万元/km² 和 35.25 万元/km²(表 3)。

祁连山南坡各市县中,天峻县、祁连县和刚察县的平均生态系统服务总价值最高,分别为 181.96 亿元、140.59 亿元和 104.96 亿元,其余县的价值在 59.28—85.25 亿元之间。单位面积服务价值最高的则是海晏县,其次为门源县和刚察县,分别为 147.92 万元/km²、129.92 万元/km² 和 128.96 万元/km²,德令哈市的最低,为 26.79 万元/km²(表 4)。从生态系统服务价值子类型看,海晏县、门源县、刚察县和祁连县的营养物质循环、生产有机质、调节气候和调节空气质量单位面积价值均较高。单位面积畜牧产品价值最高的是海晏县,其次为

刚察县,分别为 4.92 万元/km²和 3.57 万元/km²。门源县的土壤保持单位面积价值明显高于其他市县,为 8.65 万元/km²。此外,刚察县和海晏县的单位面积水源涵养服务价值均较高,分别为 32.59 万元/km²和 31.18 万元/km²(表 4)。

表 3 祁连山南坡 2000—2015 年各生态系统类型平均单位面积价值/(万元/km²)和总价值/亿元

Table 3 The average unit area value (10000 yuan/km²) and total value (100 million yuan) of each ecosystem type in the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

生态系统服务 Ecosystem service	价值 Value	高寒草甸 Alpine meadow	草原 Grassland	草本湿地 Wetland	水域 Water area	耕地 Cropland	荒漠草原 Desert steppe	森林 Forest land	灌丛 Shrub land
营养物质循环	单位面积	1.45	0.88	1.11	—	1.41	0.40	1.92	1.58
Nutrient circulation	总价值	2.40	1.54	0.62	—	0.13	0.71	0.08	0.73
生产有机质	单位面积	15.49	9.39	11.84	—	15.09	4.31	20.60	16.95
Organic matter production	总价值	25.64	16.46	6.69	—	1.43	7.65	0.86	7.86
畜牧产品	单位面积	4.34	2.24	—	—	—	0.66	—	—
Livestock production	总价值	7.19	3.92	—	—	—	1.18	—	—
土壤保持	单位面积	4.73	2.61	3.38	—	1.36	1.20	12.04	8.71
Soil conservation	总价值	7.84	4.57	1.91	—	0.13	2.12	0.50	4.04
水源涵养	单位面积	35.42	25.90	35.25	29.28	7.96	17.74	38.77	35.58
Water retention	总价值	58.61	45.40	19.91	3.36	0.76	31.46	1.61	16.50
调节气候	单位面积	45.23	27.42	34.56	—	44.07	12.59	60.13	49.48
Climate regulation	总价值	74.84	48.06	19.52	—	4.18	22.33	2.50	22.94
调节空气质量	单位面积	27.52	16.68	21.03	—	26.81	7.66	36.58	30.10
Air quality regulation	总价值	45.53	29.24	11.88	—	2.55	13.58	1.52	13.96
生态系统服务	单位面积	134.18	85.13	107.17	29.28	96.70	44.56	170.04	142.39
Ecosystem service	总价值	222.05	149.19	60.54	3.36	9.18	79.03	7.07	66.03

表 4 祁连山南坡 2000—2015 年各市县生态系统服务单位面积/(万元/km²)和总价值/亿元

Table 4 The average unit area value (10000 yuan/km²) and total value (100 million yuan) of each county in the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

生态系统服务 Ecosystem service	指标 Indicator	刚察县	海晏县	门源县	祁连县	德令哈市	天峻县
营养物质循环	单位面积价值	1.44	1.74	1.45	1.09	0.24	0.71
Nutrient circulation	总价值	1.17	0.72	1.00	1.50	0.69	1.74
生产有机质	单位面积价值	15.37	18.61	15.51	11.66	2.57	7.61
Organic matter production	总价值	12.51	7.72	10.71	16.07	7.43	18.62
畜牧产品	单位面积价值	3.57	4.92	2.42	2.44	0.21	1.56
Livestock production	总价值	2.91	2.04	1.67	3.36	0.61	3.81
土壤保持	单位面积价值	3.83	4.08	8.65	5.26	1.64	3.85
Soil conservation	总价值	3.12	1.69	5.98	7.25	4.76	9.43
水源涵养	单位面积价值	32.59	31.18	29.07	26.81	11.29	24.90
Water retention	总价值	26.52	12.93	20.07	36.94	32.65	60.93
调节气候	单位面积价值	44.87	54.33	45.28	34.05	7.50	22.22
Climate regulation	总价值	36.52	21.73	31.26	46.92	21.70	54.36
调节空气质量	单位面积价值	27.30	33.06	27.54	20.71	4.56	13.52
Air quality regulation	总价值	22.22	13.70	19.02	28.54	13.20	33.07
生态系统服务	单位面积价值	128.96	147.92	129.92	102.02	28.01	74.37
Ecosystem service	总价值	104.96	60.53	89.71	140.59	81.04	181.96

3.2 祁连山南坡 ESV 时空变化

3.2.1 2000—2015 年祁连山南坡 ESV 价值变化

2000—2015 年间,祁连山南坡生态系统服务单位面积价值呈现增长态势,年均增长率达到 $0.58 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中大多数生态系统服务子类型的单位面积价值也呈上升趋势,且以调节气候和调节空气质量服务的年均增长速率最快,分别为 $0.29 \text{ 万元 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $0.18 \text{ 万元 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。水源涵养服务和土壤保持服务较为波动,其中水源涵养服务的单位面积价值总体变化不大,而土壤保持服务的单位面积价值呈现轻微的减少(图 3)。

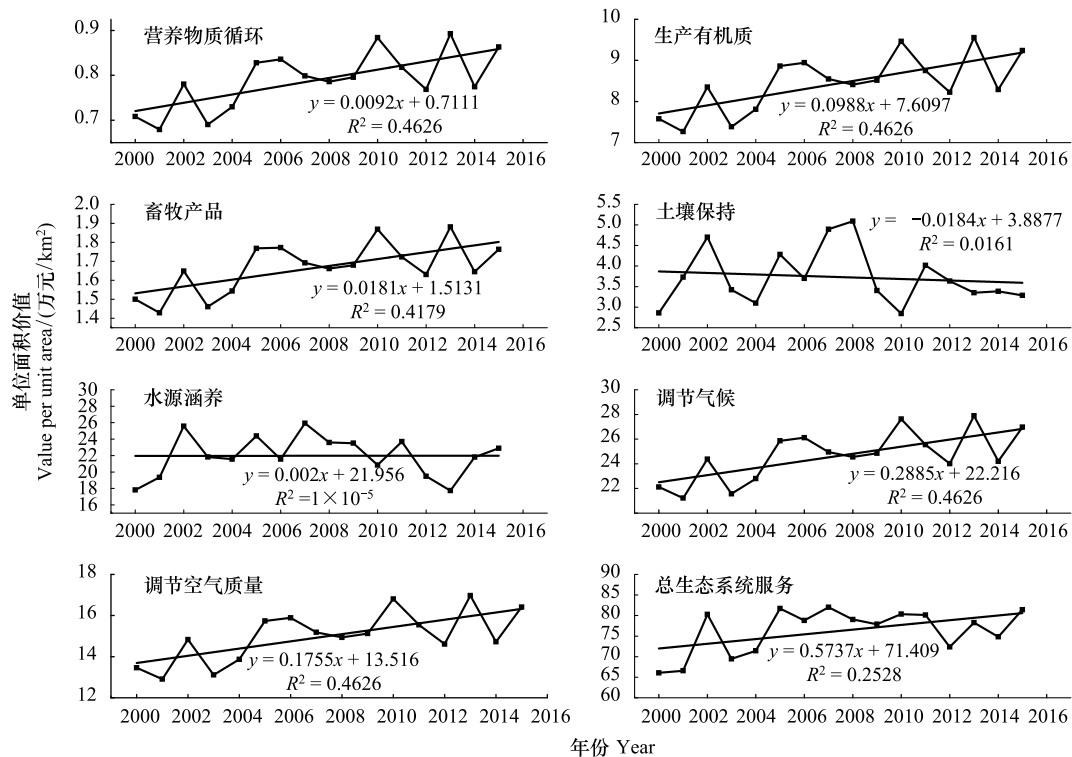


图 3 祁连山南坡 2000—2015 年生态系统服务单位面积价值变化

Fig.3 Changes in the unit area value of ecosystem services in the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

3.2.2 2000—2015 年祁连山南坡 ESV 价值空间变化

2000—2015 年间,祁连山南坡生态系统服务单位面积价值在多数区域呈增长态势,共占区域总面积的 74.32%,且以不显著增长为主(占 47.93%),显著增长和极显著增长分别占 12.92%和 13.47%,集中分布在研究区北部(图 4 和表 5)。此外,生态系统服务单位面积价值的下降主要集中在研究区西部和东南部的局部地区,且以不显著下降为主(占 21.30%),而显著和极显著下降仅占研究区总面积的 0.68%和 0.36%(图 4 和表 5)。

从不同生态系统类型来看,高寒草甸、草原和荒漠草原的生态系统服务单位面积价值的增长面积明显超过其他类型,其中草原的不显著和显著增长面积最大,占 29.06%和 30.59%,而高寒草甸的极显著增长面积最大,占 33.88%。荒漠草原的生态系统服务单位面积价值的下降面积明显大于其他类型,其中不显著、显著和极显著下降分别占 52.43%、54.92%和 62.81%(图 5)。生态系统服务单位面积价值的增长主要分布在天峻县和祁连县,其中不显著增长的 34.77%、显著增长的 34.27%和极显著增长的 17.29%分布于天峻县境内,而显著增长和极显著增长的 30.35%和 55.39%分布于祁连县境内。生态系统服务单位面积价值的下降则主要分布在德令哈市,其中不显著、显著和极显著下降的 57.13%、69.19%和 77.19%分布与该市境内(图 5)。

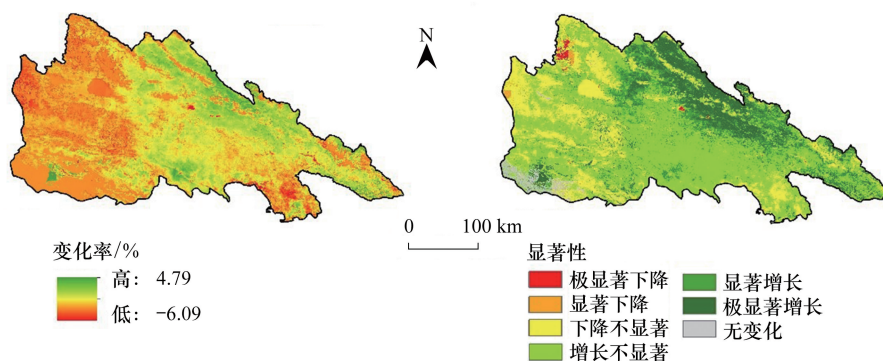


图 4 祁连山南坡 2000—2015 年生态系统服务总价值空间变化速率及其显著性

Fig.4 The spatial change rate its significance of total value of ecosystem services in the Southern Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

表 5 祁连山南坡 2000—2015 年生态系统服务价值变化显著性面积比例

Table 5 Significant area proportion of ecosystem services value change on the South Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

显著性 Significance level	面积比例/% Area ratio	显著性 Significance level	面积比例/% Area ratio
下降 Decrease **	0.36	增长 Increase *	12.92
下降 Decrease *	0.68	增长 Increase **	13.47
下降 Decrease	21.30	无变化 No change	3.34
增长 Increase	47.93		

** 和 * 分别表示变化达到极显著 ($\alpha=0.01$) 和显著 ($\alpha=0.05$) 水平

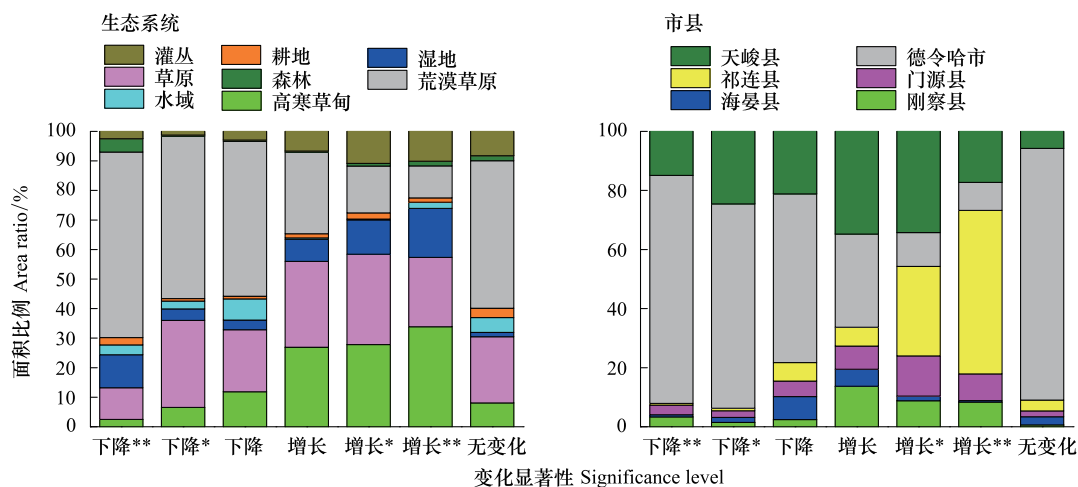


图 5 祁连山南坡 2000—2015 年不同生态系统类型和市县生态系统服务价值变化显著性面积比例

Fig.5 Significant area proportion of ecosystem services value change of different ecosystem types and counties in the South Slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015

** 和 * 分别表示变化达到极显著 ($\alpha=0.01$) 和显著 ($\alpha=0.05$) 水平

3.3 祁连山南坡生态功能分类

由祁连山南坡生态功能分类结果可知,复合生态功能区集中在研究区东部,这和气候条件以及生态系统类型分布有关。研究区中部集中分布有机物质水源涵养复合生态功能分类区,该功能分类区主要由湿地构成,既提供水源涵养服务,同时具有生产有机物质、营养物质循环、调节气候和调节空气质量的生态服务功能。

研究区东端及北部山区集中分布有机物质水源涵养土壤保持复合生态功能分类区,该功能分类的生态系统类型主要是森林和灌丛,生态系统服务的复合程度高,对周边地区的水文、气候和土壤保持具有重要作用。畜牧有机物质水源涵养复合生态功能分类区则集中在研究区南部环青海湖地区,该功能分类区以高寒草甸为主,净初级生产力较高,因此理论载畜量也较高,该功能分类区可以通过合理规划,在控制放牧强度的前提下,兼顾生产和生态功能。此外,研究区还分布有多项复合生态功能分类区,但较为零碎,且和其他功能分类区相伴分布(图 6)。

4 讨论

本研究发现祁连山南坡多年平均生态系统服务总价值为 658.74 亿元,单位面积价值 76.27 万元/km²。由于生态系统服务价值的分类、计算方法及价值量均有差异,且目前本地区尚未见相关报道,因此我们通过与相近地区、相同生态系统类型及其服务价值的对比,验证本研究结果。

本研究中,灌丛的营养物质循环、调节气候(释放 CO₂)以及调节空气质量(释放 O₂)服务的单位面积价值分别为 1.58 万元/km²、49.48 万元/km²和 30.10 万元/km²,这和汪有奎等^[32]在甘肃省祁连山保护区的研究结果较为接近。而本文对祁连山南坡水源涵养和土壤保持服务单位面积价值的估算分别为平均 21.97 万元/km²和 3.73 万元/km²,略低于赖敏等^[57]在三江源地区

的研究结果。本文对祁连山南坡理论载畜量的估算结果为 27.77 只(标准羊)/km²,这也和辛有俊等^[58]对青海省海北州的草地理论载畜量的估算结果较为接近。研究发现,祁连山南坡的多数生态系统服务价值呈增长态势,同样,陈春阳等^[59]和赖敏等^[57]的研究结果也显示三江源地区的生态系统服务价值呈增长态势,赵苗苗等^[60]发现青海省 1998—2012 年的生态系统服务价值也呈增长趋势。这主要和青藏高原以及祁连山地区近年来植被状况改善有关^[61-62],植被生产力的提高能够促进各项生态系统服务功能发挥、增加服务价值。

本区主体生态系统类型为草地,其中荒漠草原分布在研究区西部,东部主要为高寒草甸和草原,而后的单位面积服务价值远远大于前者,因此生态系统服务的主要载体为高寒草甸和高寒草原。此外,森林和灌丛主要分布在东部山区,面积不大,但是由于多数生态系统服务基于 NPP 计算,而这两类的 NPP 较高,故其单位面积服务价值较高。祁连山南坡生态系统服务价值具有明显的空间分异特征,其中东部地区的生态系统服务价值明显大于西部地区,且在东南角(青海湖东侧)达到最高值。这是由于研究区西部深入内陆,地处柴达木盆地东缘,气候干燥少雨,主要分布荒漠生态系统类型,其生态系统服务能力较低,而研究区东部处于季风区边缘,且地形起伏较大,降水较多,生态系统类型多样,因此生态系统服务单位面积价值较高。

研究区多数基于 NPP 计算的生态系统服务价值均表现为增长趋势,这和本区关于 NDVI 或 NPP 的研究结果一致,其主要受气候变化以及生态工程实施的影响^[61-62],其中显著增长区域集中在研究区北部,可能是由于山区植被对气候变化的响应更加敏感^[63],也可能与冰川退缩带来的地表和地下径流增加有关^[64]。此外,与森林和灌丛相比,草地类型的生态系统服务单位面积价值增速更快,这是因为其对气候气候变化的反应更迅速^[65]。基于生态系统服务价值的祁连山南坡生态服务功能分类结果对于本区域生态保护和政策制定具有一定参考价值。例如南部环青海湖地区同时具有畜牧生产、有机物质生产和水源涵养服务功能,因此本区能够在合理控制载畜量前提下,积极发展畜牧业,同时不至于破坏其他服务类型,而研究区北部和东端山区,则应该严格保护生态系统原真性,从而维持其提供多项生态系统服务的能力。

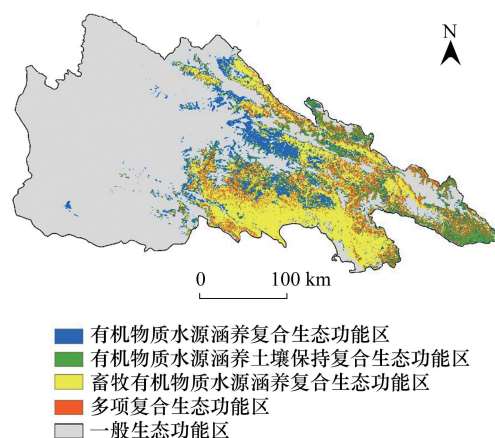


图 6 祁连山南坡生态功能分类

Fig.6 Ecological function classification of the Southern Slope of Qilian Mountain

本文估算的祁连山南坡生态系统服务总价值只是一个保守值,这是由于数据和方法的限制,我们并未计算研究区的生物多样性保护、文化休憩等其他类型的服务价值;此外,本文仅计算了 2000 年后连续的生态系统服务价值变化,而未涉及更长时间序列的变化。因此,在下一步工作中,需要结合其他类型数据,对祁连山南坡的生态系统服务进行更全面的评价。

5 结论

(1) 祁连山南坡多年平均生态系统服务总价值为 658.74 亿元,单位面积价值为 76.27 万元/km²,其中调节气候、水源涵养和调节空气质量服务为主体生态系统服务类型。从生态系统类型来看,森林和灌丛的生态系统服务能力较高,但草甸和草原是区域提供生态系统服务的主体。从空间分布来看,生态系统服务单位面积价值呈现“东高西低”的特点,其中海晏县的单位面积服务价值最高,天峻县和祁连县的服务总价值最高。

(2) 2000—2015 年,除水源涵养和土壤保持服务价值保持稳定外,其他生态系统服务类型的价值处于增长太少,且调节气候和调节空气质量服务价值的年均增长速率最快。多数区域均有增长,但显著和极显著增长集中在研究区北部,减少部分集中在德令哈市,且多数未通过显著性检验。从生态系统类型来看,高寒草甸和草原的生态系统服务单位面积增长速率较快。

(3) 研究区东部能够提供多项生态系统服务功能,其中北部山区和东端分布有机物质水源涵养土壤保持复合生态功能分类区,中部分布有有机物质水源涵养复合生态功能分类区,而南部环青海湖地区则分布畜牧有机物质水源涵养复合生态功能区。

参考文献 (References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington: Island Press, 2005.
- [2] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [3] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997.
- [5] Palmer M, Bernhardt E, Chornesky E, Collins S, Dobson A, Duke C, Gold B, Jacobson R, Kingsland S, Kranz R, Mappin M, Martinez M L, Micheli F, Morse J, Pace M, Pascual M, Palumbi S, Reichman O J, Simons A, Townsend A, Turner M. Ecology for a crowded planet. *Science*, 2004, 304(5675): 1251-1252.
- [6] Beier C M, Patterson T M, Chapin III F S. Ecosystem services and emergent vulnerability in managed ecosystems: a geospatial decision-support tool. *Ecosystems*, 2008, 11(6): 923-938.
- [7] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [8] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [9] 谢高地,甄霖,鲁春霞,肖玉,陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [10] 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.
- [11] Qian D W, Yan C Z, Xiu L N, Feng K. The impact of mining changes on surrounding lands and ecosystem service value in the Southern Slope of Qilian Mountains. *Ecological Complexity*, 2018, 36: 138-148.
- [12] Zhang F, Yushanjiang A, Jing Y Q. Assessing and predicting changes of the ecosystem service values based on land use/cover change in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 1133-1144.
- [13] Grafius D R, Corstanje R, Warren P H, Evans K L, Hancock S, Harris J A. The impact of land use/land cover scale on modelling urban ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2016, 31(7): 1509-1522.
- [14] Milheiras S G, Mace G M. Assessing ecosystem service provision in a tropical region with high forest cover: spatial overlap and the impact of land use change in Amapá, Brazil. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 12-18.
- [15] Vigl L E, Tasser E, Schirpke U, Tappeiner U. Using land use/land cover trajectories to uncover ecosystem service patterns across the Alps. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(8): 2237-2250.

- [16] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 316-325.
- [17] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [18] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 王瑞杰, 徐斌, 卢琦. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究. 自然资源学报, 2007, 22(2): 161-170.
- [19] 王爱玲, 朱文泉, 李京, 陈云浩. 内蒙古生态系统服务价值遥感测量. 地理科学, 2007, 27(3): 325-330.
- [20] 许旭, 任斐鹏, 韩念龙. 2000—2009 年河北省生态系统服务价值时空动态遥感监测. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 187-193.
- [21] 亢红霞, 那晓东, 臧淑英. 1980—2010 年松嫩平原湿地生态服务功能价值评估. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 193-200.
- [22] Pettorelli N, Schulte to Bühne H, Tulloch A, Dubois G, Macinnis - Ng C, Queirós A M, Keith D A, Wegmann M, Schrodte F, Stellmes M, Sonnenschein R, Geller G N, Roy S, Somers B, Murray N, Bland L, Geijzendorffer I, Kerr J T, Broszeit S, Leitão P J, Duncan C, El Serafy G, He K S, Blanchard J L, Lucas R, Mairota P, Webb T J, Nicholson E. Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2018, 4(2): 71-93.
- [23] Stritih A, Bebi P, Grêt-Regamey A. Quantifying uncertainties in earth observation-based ecosystem service assessments. Environmental Modelling & Software, 2019, 111: 300-310.
- [24] Paruelo J M, Texeira M, Staiano L, Mastrángelo M, Amdan L, Gallego F. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. Ecological Indicators, 2016, 71: 145-154.
- [25] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [26] Martínez-López J, Bagstad K J, Balbi S, Magrach A, Voigt B, Athanasiadis I, Pascual M, Willcock S, Villa F. Towards globally customizable ecosystem service models. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2325-2336.
- [27] 王涛, 高峰, 王宝, 王鹏龙, 王勤花, 宋华龙, 尹常亮. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议. 冰川冻土, 2017, 39(2): 229-234.
- [28] 王仑, 虞敏, 戚一应, 曹广超. 基于 MODIS 数据的祁连山南坡土壤水分反演研究. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2017, 33(2): 84-91.
- [29] 张文杰, 程维明, 李宝林, 仝迟鸣, 赵敏, 王楠. 气候变化下的祁连山地区近 40 年多年冻土分布变化模拟. 地理研究, 2014, 33(7): 1275-1284.
- [30] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 近 50 年来河西走廊区域生态环境变化特征与综合防治对策. 自然资源学报, 2002, 17(1): 78-86.
- [31] 汤萃文, 杨莎莎, 刘丽娟, 张忠明, 肖笃宁, 田赐冬. 基于能值理论的东祁连山森林生态系统服务功能价值评价. 生态学杂志, 2012, 31(2): 433-439.
- [32] 汪有奎, 郭生祥, 汪杰, 袁虹, 徐柏林, 王多尧. 甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1905-1911.
- [33] 靳芳, 张振明, 余新晓, 饶良懿, 牛健植, 鲁绍伟, 谢媛媛. 甘肃祁连山森林生态系统服务功能及价值评估. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 53-57.
- [34] 丁娜娜. 祁连山自然保护区森林资源资产价值评估研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [35] 李姗姗. 基于 RS 与 GIS 的祁连山南坡水源涵养量估算系统研究与实现[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015.
- [36] Didan K. MOD13Q1 v006 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid. [2019-05-18]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>.
- [37] Running S. MOD17A3H V006 MODIS/Terra Net Primary Production Yearly L4 Global 500 m SIN Grid. [2019-05-18]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hv006/>.
- [38] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [39] Chen Y Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J C, Du J Y, He Q. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D20): D20104.
- [40] Yang K, He J, Tang W J, Qin J, Cheng C C K. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.
- [41] Fischer G, van Velthuisen H, Shah M, Nachtergaele F. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- [42] 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.
- [43] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses-a Guide to Conservation Planning. Washington, USA: USDA, 1978.
- [44] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1990, 329(1255): 421-428.
- [45] Sharpley A N, Williams J R. EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. Washington: USA Government Printing Office, 1990: 235-235.

- [46] 郭伟. 北京地区生态系统服务价值遥感估算与景观格局优化预测[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [47] 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.
- [48] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.
- [49] 王兵, 杨锋伟, 郭浩, 李少宁, 王燕, 马向前, 余新晓, 鲁绍伟. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [50] 王静, 尉元明, 孙旭映. 过牧对草地生态系统服务价值的影响——以甘肃省玛曲县为例. 自然资源学报, 2006, 21(1): 109-117.
- [51] 赵卫, 沈渭寿, 刘波, 林乃峰, 王涛. 西藏地区草地承载力及其时空变化. 科学通报, 2015, 60(21): 2014-2028.
- [52] 中华人民共和国农业部. NY/T 635—2002 天然草地合理载畜量的计算. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [53] 俞锡章, 路元新, 周俊生. 青海祁连山地区藏系绵羊日食量的初步研究. 中国草原, 1982, (1): 58-59.
- [54] 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 王秋风, 彭舜磊. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析. 第四纪研究, 2014, 34(4): 769-776.
- [55] 董全民, 赵新全, 李世雄, 施建军, 王彦龙, 郑伟, 候宪宽, 宋磊. 基于高寒草地放牧系统次级生产力的优化放牧强度研究. 草地学报, 2014, 22(5): 919-923.
- [56] 王瑞杰, 覃志豪, 王桂英. 呼伦贝尔草原产草量及载畜平衡研究. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(12): 1782-1785.
- [57] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 尹云鹤, 潘韬, 赵东升. 生态建设背景下三江源自然保护区生态系统服务价值变化. 山地学报, 2013, 31(1): 8-17.
- [58] 辛有俊, 杜铁瑛, 辛玉春, 吴阿迪, 陆福根. 青海草地载畜量计算方法与载畜压力评价. 青海草业, 2011, 20(4): 13-22.
- [59] 陈春阳, 戴君虎, 王焕炯, 刘亚辰. 基于土地利用数据集的三江源地区生态系统服务价值变化. 地理科学进展, 2012, 31(7): 970-977.
- [60] 赵苗苗, 赵海凤, 李仁强, 张丽云, 赵峰侠, 刘丽香, 沈瑞昌, 徐明. 青海省 1998—2012 年草地生态系统服务功能价值评估. 自然资源学报, 2017, 32(3): 418-433.
- [61] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.
- [62] 张德铨, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [63] 李博, 曾彪, 杨太保. 1982—2015 年柴达木盆地不同流域植被气候响应差异. 干旱区地理, 2018, 41(3): 449-458.
- [64] 张晓鹏, 秦翔, 吴锦奎, 陈记祖, 王强, 杜文涛, 刘宇硕. 祁连山老虎沟流域强消融期径流对气候变化的响应. 冰川冻土, 2017, 39(1): 148-155.
- [65] 丁明军, 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 杨续超. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. 地理科学进展, 2010, 29(4): 507-512.