

DOI: 10.5846/stxb202002220305

肖骁, 李京忠, 杨新军, 张子龙, 薛冰. 黄河流域中上游林草生态调节服务功能价值核算. 生态学报, 2022, 42(19): 7830-7844.

Xiao X, Li J Z, Yang X J, Zhang Z L, Xue B. Evaluation of forest-grassland ecosystem services value in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7830-7844.

黄河流域中上游林草生态调节服务功能价值核算

肖 骁^{1,2,3}, 李京忠^{2,4,*}, 杨新军⁵, 张子龙⁶, 薛 冰^{1,2}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 辽宁省环境计算与可持续发展重点实验室, 沈阳 110016

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 许昌学院城市与环境学院, 许昌 461000

5 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

6 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘要:科学评估林草生态系统服务功能价值,对于掌握流域生态资产储量,推动高质量发展与生态保护具有重要基础性意义。基于多源数据开展林草生态服务功能价值的高分辨率核算及空间格局分析,结果表明:集成运用遥感产品、气象数据以及生态统计调查数据等多源数据,并参考已有生态服务价值评估规范和文献资料,构建的 1km×1km 像素尺度林草生态系统调节服务功能价值体系,克服了传统统计监测数据在准确度和研究粒度方面的局限,为系统、协同的区域生态治理提供依据;2015 年黄河中上游流域林草生态调节服务功能价值为 18997.69 亿元,其中森林提供 11833.11 亿元,草地提供 7164.58 亿元;单位面积林草生态调节服务价值高值区域为青海-甘肃-陕西-山西境内水热条件较好的山地,低值连片区域广布在中部黄土高原,这与森林郁闭度、草地盖度以及区域降水、地形等自然条件有关;在黄河流域生态保护与高质量发展中,应注重以生态服务功能为基础,突破行政区划边界限制,建立生态产品价值实现机制,提升区域高质量发展中生态效益的价值权重。

关键词:人地关系;林草生态系统;生态服务功能价值;黄河流域;高质量发展

Evaluation of forest-grassland ecosystem services value in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin, China

XIAO Xiao^{1,2,3}, LI Jingzhong^{2,4,*}, YANG Xinjun⁵, ZHANG Zilong⁶, XUE Bing^{1,2}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Key Lab for Environmental Computation and Sustainability of Liaoning Province, Shenyang 110016, China

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

4 College of Urban and Environmental Sciences, Xuchang University, Xuchang 461000, China

5 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

6 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The forest-grassland ecosystem in the middle and upper reaches of the Yellow River has important ecological service functions and is the key ecological foundation for the sustainable development in the basin. Calculating the value of the forest-grassland ecosystem services functions in the middle and upper reaches of the Yellow River is of fundamental importance for grasping the ecological asset reserves and promoting high-quality development. The environmental conditions of the middle and upper reaches of the Yellow River are complex and diverse, and there are spatial differences in ecosystem

基金项目:中国科学院美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23070503);国家自然科学基金项目(41971166,41471116);中国科学院青年创新促进会项目(2016181)

收稿日期:2020-02-22; 网络出版日期:2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhong_lj@163.com

service level. Therefore, it is an urgent problem to accurately assess the value of forest-grassland ecological services in this region from a micro-scale. Based on multi-source spatial data and spatial analysis method, high-resolution accounting and spatial pattern analysis of forest and grassland ecosystem services were carried out. This study integrated use of remote sensing data products, meteorological data, ecological statistical survey data and other multi-source data. A 1km×1km pixel scale forest and grass ecosystem adjustment service function value system was constructed by referring to the existing ecological service value evaluation norms and literatures. This system overcomes the limitations of traditional statistical monitoring data in terms of accuracy and pixel size, providing a basis for systematic and coordinated regional ecological governance. In 2015, the value of forest and grassland ecological service functions in the middle and upper reaches of the Yellow River basin was 1.90 trillion yuan, of which the value provided by the forest ecosystem was 1183.31 billion yuan, the value provided by grassland ecosystem was 716.46 billion yuan. The high-value areas of forest and grassland ecosystem service value per unit area were mountains with good hydrothermal conditions in Qinghai-Gansu, Shaanxi-Shanxi; The low-value continuous areas were widely distributed in the Loess Plateau, which was closely related to the natural conditions such as the forest depression, grassland coverage, regional precipitation and topography. The values of six forest ecosystem service functions were mainly distributed in the three regions of Qinghai-Gansu in the west, Ningxia-Inner Mongolia in the north-central, and Shaanxi-Shanxi in the east. The service function value of grassland ecosystem mainly presented a spatial pattern of "high in the south and low in the north". In the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin, we should pay attention to the ecological service function as the basis and break through the boundary limits of the administrative region to establish the ecological product value realization mechanism and enhance the value weight of the ecological benefits.

Key Words: human-land relationship; forest-grassland ecosystem; ecological service value; the Yellow River Basin; high quality development

黄河流域是华夏文明的发源地,也是我国重要的生态屏障。2019年9月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上发表讲话,强调黄河流域生态保护和高质量发展^[1]。黄河中上游地区作为黄河流域的重要组成部分,约占黄河流域面积的97%,生态功能地位突出,中上游流域生态环境质量直接决定了下游地区的环境状况^[2-3]。在多年持续治理下,黄河中上游的水土流失、河流泥沙淤积、洪水灾害等局面得到有效改善,但由于生态脆弱性及不稳定性使得中上游流域生态系统保护与治理依然重要^[4-5]。林草生态系统作为陆地生态系统重要组成部分,是全球大气、水及土壤等生态要素的连结纽带^[6],对流域生态系统起到涵养水源、保持水土及维持生物多样性等重要调节作用,是流域实现经济-社会-环境可持续发展的关键生态基础^[7-9]。测算黄河中上游林草地生态调节服务功能价值,对于明确流域生态服务功能的本底价值、制定生态治理及调控对策,进而处理好流域经济发展与生态保护之间的关系具有重要意义^[10-12]。

生态系统服务功能的研究起步于 Daily 对自然生态系统为人类提供的各种服务及价值的阐述^[13]。Costanza 等提出了对生态服务价值进行评估的原理及方法,并将全球生态系统分为16类,并以气体调节、水调节等指标开展生态系统价值测算^[14]。相继有学者对不同生态系统服务价值进行了探讨,例如评估草地在维持大气环境、保持土壤以及和基因遗传等方面的服务功能^[15];阐述森林在生物多样性维护、流域保护、固碳以及游憩方面的价值^[16-17];估算生态系统维持生物多样性、气体调节等服务功能总价值^[9,18-19]。联合国千年生态系统评估组开展了“生态系统与人类福祉”研究^[20],定量评估生态系统服务功能价值,为推动生态系统的保护和可持续利用奠定科学基础。当前,生态系统服务功能价值评估技术及方法成为了该领域重要交叉前沿课题^[21-23],例如利用当量因子法^[24]、功能价值法^[25]等估算生态系统生态服务价值。但传统方法多是基于统计或调查数据的静态估算,难以掌握服务价值在区域内的空间格局及微观变化规律^[26-27]。而考虑到不同区域生态系统的多样性和环境条件的多样性,生态系统服务强度存在着空间差异性,因此微观尺度的生态服

务价值空间异质性是重要的科学问题。基于遥感技术的生态系统服务功能价值评估近年来得到了普遍关注^[28]。目前主要有两种主要的评估方法:一是利用遥感数据计算生态系统面积并根据面积计算结果构建当量因子法模型^[29-31],二是整合遥感数据和生态学参数数据,借助生理生态模型进行价值量计算^[32-34]。以上研究克服了传统静态评估技术对服务功能价值量空间异质性认识不足的问题,提升了评估结果的精度和可靠性。

作为我国重要生态屏障和经济地带的黄河流域,目前仍然存在系列生态环境问题,制约着流域经济社会的可持续发展^[35]。其中黄河上游草场植被退化,降低了水源涵养能力;中上游地区土地沙化和水土流失严重,易造成洪涝灾害。林草生态系统具有的水源涵养、水土保持等功能,对于流域生态环境保护与治理意义重大^[36]。开展林草生态系统调节服务功能价值的精细化评估,根据价值量的空间分布特征,制定环境功能区划、生态恢复和生态补偿等政策,有利于生态系统优化配置,促进生态服务功能的正常发挥和生态产品价值实现,推进流域生态环境系统治理并促进全流域高质量发展^[37]。然而目前林草生态系统服务价值评价在指标体系建立和评估参数选取等方面仍然具有一定主观性,大区域尺度的遥感影像解译和模型构建相对困难^[38],因此如何提高小区域评估参数体系的科学性同时提高大区域评估结果的精细度是目前面临的重要挑战。因此本文以黄河中上游流域为研究区域,基于多源空间数据以及遥感与空间统计分析技术,集成联合国千年生态系统评估框架、《森林生态系统服务功能评估规范》(以下简称《规范》)^[39]以及国内外林草生态服务功能价值评估的方法体系和基础参数数据,尝试构建像元尺度的林草生态调节服务功能价值评估体系,明确黄河中上游流域生态服务功能价值组成及空间格局,以期为黄河流域生态保护与治理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河中上游地区西起黄河源头的约古宗列曲,东至华北平原西部边界,南至秦岭北麓,北至阴山。从西到东主要横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原 3 个地貌区,涉及青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南 8 个省域,包括 60 个地级市域。地理坐标为东经 $95^{\circ}42'$ — $113^{\circ}35'$,北纬 $32^{\circ}12'$ — $41^{\circ}50'$,面积约 77.2 万 km^2 ^[40]。其中,上游为青海河源至内蒙古托克托县的河口镇,流域面积 42.8 万 km^2 ,属高寒地区;中游自河口镇至河南郑州桃花峪,流域面积 34.4 万 km^2 ,地处黄土高原区。黄河中上游流域属于干旱和半干旱气候,并受到降水集中、毁林开荒、城市建设等因素的影响,是我国典型生态环境脆弱区,区域开发与生态保护关系复杂,人地矛盾突出,生态保护与高质量发展需求迫切。

1.2 数据来源及预处理

(1) 黄河流域边界数据:黄河流域边界数据来源于国家地球系统科学数据中心,数据生产过程是在中国 1:25 万一级、二级流域分级基础上,结合相应数字高程信息进行提取。根据黄河中上游起讫地点^[41]提取黄河中上游边界。

(2) 土地利用数据:2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)中国土地利用现状遥感监测数据库,以 Landsat 卫星影像为数据源,空间分辨率重采样至 $1\text{km}\times 1\text{km}$ ^[41],投影坐标系统为阿尔伯斯等积圆锥投影。通过提取有林地(郁闭度 $>30\%$ 的天然林和人工林)、灌木林(指郁闭度 $>40\%$ 且高度 $<2\text{m}$ 矮林地和灌丛林地)、疏林地(林木郁闭度为 10% — 30% 的林地)开展森林生态服务价值评估;将高覆盖度草地(覆盖度 $>50\%$ 的天然草地)、中覆盖度草地(覆盖度在 20% — 50% 的天然草地和改良草地)和低覆盖度草地(覆盖度在 5% — 20% 的天然草地)统称为“草地”类型,进行草地生态系统价值评估;最终得到 2015 年黄河中上游林地面积 104545km^2 ,草地面积 375753km^2 (表 1)。

(3) 遥感产品数据:归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据来源于中国科学院资源环境数据云平台,NDVI 是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,采用最大值合成法生成,以上数据经过拼接、裁剪、重采样操作得到

1km×1km 分辨率的 NDVI 和 DEM 数据。

表 1 2015 年黄河中上游流域林草地面积/km²

Table 1 Forest and grassland area by remote sensing interpretation

省份 Provinces	林地 Woodland					草地 Grassland			
	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	合计	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	合计
青海省	2207	12527	1373	4	16111	15390	36297	24881	76568
甘肃省	4641	8468	3784	679	17572	6796	29080	13527	49403
四川省	167	650	28	0	845	2481	11540	5973	19994
宁夏回族自治区	259	1173	674	396	2502	11713	11081	11482	34276
内蒙古自治区	3404	2812	1099	151	7466	19650	34468	27079	81101
陕西省	6872	10812	3820	1547	23051	15311	37222	21447	73980
山西省	12494	10724	5282	355	28855	6036	7016	15131	28183
河南省	6804	816	451	72	8143	2462	5523	4263	12248
总计 Total	36848	47982	16511	3204	104545	79839	172227	123783	375753

(4) 气象数据及其他:从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取研究区 2015 年黄河中上游流域内 72 个气象站点及流域周边地区 51 个气象站点的平均降水量、平均气温、平均水汽压、平均相对湿度、月日照百分率的实测数据,对以上气象数据进行普通克里金插值并裁切,得到 1km×1km 分辨率气象栅格数据。其他基础统计数据来源于流域内部分地区水资源公报、统计年鉴等资料^[42-46],或已有研究文献中的历史记录数据以及实地采样观测数据^[47-57]。

2 研究方法

2.1 评估方法与指标体系

结合黄河中上游流域生态系统特点及森林生态系统服务功能评估规范,利用市场价格法、影子价值法、机会成本法等评估方法^[48],开展中上游流域的林草生态系统调节服务功能价值核算。森林生态系统服务功能参考《规范》^[39],选取涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护 6 项服务功能建立评估体系(表 2)。

草地生态系统服务功能参考千年生态系统评估框架与既有研究^[49],选取涵养水源、土壤保持、固碳释氧、营养物质保持、环境净化 5 项进行评估。各项价值量计算公式为公式(1)—公式(20),常数类参数引自《森林生态系统服务功能评估规范》以及相关文献,非常数类参数来源于土地利用数据、遥感产品数据以及政府统计数据。对于无法从已有数据直接取值的参数(如土壤侵蚀模数、NPP 数据等)利用遥感影像、气象监测数据等建模反演以 1km×1km 像素格网作为最小评估单元进行价值量核算。受限于数据、评估方法等因素,生物多样性保护价值仅考虑森林生态系统,未对森林防护功能以及草地废弃物降解功能进行价值核算。

2.2 部分关键评估参数求解

2.2.1 净初级生产力计算

森林和草地生态系统植被净初级生产力(NPP)基于 2015 年植被指数与气象监测数据,借鉴姜立鹏等构建的光能利用率模型^[32]计算得到,计算公式如下:

$$NPP = (FPAR \times PAR) \times (\varepsilon^* \times \sigma T \times \sigma E) \quad (21)$$

$$FPAR = \frac{(VI - VI_{\min})(FPAR_{\max} - FPAR_{\min})(FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{VI_{\max} - VI_{\min}} + FPAR_{\min} \quad (22)$$

$$PAR = 0.47Q \quad (23)$$

$$Q = Q_0(a + bS) \quad (24)$$

$$Q_0 = 0.0418675(c_0 + c_1\varphi + c_2H + c_3e) \quad (25)$$

表 2 林草生态系统服务功能价值量评估公式及参数说明

功能 Function	计算公式 Formula	参数说明 Parameter description	参数来源及依据 Parameter source
U_1	$U_{\text{水量}} = 10 C_{\text{库}} S_i (P - E - C) \quad (1)$ $U_{\text{水质}} = 10 C_{\text{水质}} S_i (P - E - C) \quad (2)$	<p>$U_{\text{水量}}$ 为森林调节水量价值, $C_{\text{库}}$ 为水库建设单位库容投资量, S_i 为第 i 类森林面积, P 为年均降水量, E 为年均蒸散量, C 为年均地表径流量; $U_{\text{水质}}$ 为森林净化水质价值, $C_{\text{水质}}$ 为水净化费用。</p>	《规范》公共数据、基础统计数据、土地利用数据
U_2	$U_{\text{固土}} = C_{\pm} \frac{S_i (X_2 - X_1)}{\rho} \quad (3)$ $U_{\text{肥}} = S_i (X_2 - X_1) \sum (C_j \times P_j) \quad (4)$	<p>$U_{\text{固土}}$ 是森林固土价值, $U_{\text{肥}}$ 是森林保肥价值, X_1 为现实土壤侵蚀模数, X_2 为潜在土壤侵蚀模数, C_{\pm} 为挖取和运输单位体积土方所需费用, ρ 为林地土壤容量, C_j 为森林土壤含第 j 种营养物质质量分数, P_j 为第 j 种营养物质市场价格。</p>	《规范》公共数据、基础统计数据、土地利用数据、遥感产品数据、气象监测数据、郭生祥等 ^[50]
U_3	$U_{\text{碳}} = S_i C_{\text{碳}} (1.63 R_{\text{碳}} B_{\text{年}} + F_{\pm}) \quad (5)$ $U_{\text{氧}} = 1.19 C_{\text{氧}} \sum S_i B_{\text{年}} \quad (6)$	<p>$U_{\text{碳}}$ 为森林固碳价值, $U_{\text{氧}}$ 为森林释氧价值, $B_{\text{年}}$ 为森林净生产力, $C_{\text{碳}}$ 为固碳价格, $C_{\text{氧}}$ 为氧气价格, $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中碳的含量, F_{\pm} 为单位置森林土壤年固碳量。</p>	《规范》公共数据、土地利用数据、遥感产品数据、龙启德等 ^[51] 、姜立鹏等 ^[32] 、Running 等 ^[52] 、杨东辉 ^[53]
U_4	$U_{\text{营}} = \sum (M_p \times N_p) S_i B_{\text{年}} \quad (7)$	<p>$U_{\text{营}}$ 为森林累积营养物质价值, M_p 为森林含第 p 类养分质量分数, N_p 为第 p 类养分价格。</p>	《规范》公共数据、土地利用数据、郭生祥等 ^[50]
U_5	$U_{\text{负}} = (Q_{\text{负}} - 600) \times 5.256 \times 10^{15} \times S_i H K_{\text{负}} \frac{L}{L} \quad (8)$ $U_{\text{污}} = \sum_{j=1}^n S_i \times (K_j \times Q_j) \quad (9)$ $U_{\text{噪}} = K_{\text{噪}} A_{\text{噪}} \quad (10)$ $U_{\text{滞}} = \sum S_i K_{\text{滞}} Q_{\text{滞}} \quad (11)$	<p>$U_{\text{负}}$ 为生产负离子价值, $K_{\text{负}}$ 为负离子生产费用, $Q_{\text{负}}$ 为林分负离子浓度, L 为负离子寿命, H 为森林高度; $U_{\text{污}}$ 为森林大气环境净化污染物总价值, K_j 为第 j 种污染物的净化效率, Q_j 为第 j 种污染物的净化市场价值, $U_{\text{噪}}$ 为森林降低噪音价值, $K_{\text{噪}}$ 为降低噪音价格, $A_{\text{噪}}$ 为折合为隔音墙的公里数, $U_{\text{滞}}$ 为林分年滞尘价值, $K_{\text{滞}} A_{\text{滞}}$ 为折合为隔音墙的公里数, $U_{\text{滞}}$ 为林分年滞尘量, $K_{\text{滞}} A_{\text{滞}}$ 为降尘清理费用, $Q_{\text{滞}}$ 为单位面积林分年滞尘量。</p>	《规范》公共数据、土地利用数据、郭生祥等 ^[50] 、孔德昌 ^[54]
U_6	$U_{\text{生物}} = S_i \times S_{\text{生}} \quad (12)$	<p>$U_{\text{生物}}$ 为林分年物种保育价值, $S_{\text{生}}$ 为单位面积年物种损失的机会成本。</p>	《规范》公共数据、土地利用数据、郭生祥等 ^[50]
V_1	$V_{\text{水量}} = P_w \times S \times J \times K \times R \quad (13)$	<p>$V_{\text{水量}}$ 为草地调节水量价值, P_w 为水库造价, J 为地区多年平均降雨总量, K 为流域产流降雨量占降雨总量比例, R 为与裸地相比草地生态系统截留降水、减少径流的效益系数, S_i 为草地面积。</p>	土地利用数据、气象监测数据、基础统计数据、方瑜等 ^[48]
V_2	$V_{\text{碳}} = P \times S \times (A_p - A_r) / (\rho \times H) \quad (14)$ $V_{\text{肥}} = S \times (A_p - A_r) \times \sum (C_i \times P_i) \quad (15)$	<p>$V_{\text{碳}}$ 为减少土地废弃价值, P 为土地年均收益, S 为研究区草地面积, A_p 为草地潜在土壤侵蚀模数, A_r 为草地现实土壤侵蚀模数, ρ 为草地的土壤容量, H 为草地的计算深度; $V_{\text{肥}}$ 为草地保肥价值, C_i 为土壤中第 i 类型养分含量, P_i 为第 i 类养分的市场价格。</p>	土地利用数据、遥感产品数据、气象监测数据、方瑜等 ^[48]

续表

功能 Function	计算公式 Formula	参数说明 Parameter description	参数来源及依据 Parameter source
V_3	$V_{\text{碳}} = P_c \times (1.62 \times \text{NPP} + R_c \times S) \quad (16)$ $V_{\text{氧}} = 1.2 \times P_o \times \text{NPP} \quad (17)$	<p>$V_{\text{碳}}$ 为草地固碳价值, P_c 为市场固定 CO_2 价格, NPP 为草地的净初级生产力, R_c 为草地土壤固碳速率。 P_o 为市场制造 O_2 价格。</p>	土地利用数据、遥感产品数据、气象监测数据、方瑜等 ^[48] 、姜立鹏等 ^[32] 、Running 等 ^[52] 、杨东辉 ^[53]
V_4	$V_{\text{生物}} = \text{NPP} \times (C_n \times P_n + C_p \times P_p) \quad (18)$ $V_{\text{土壤}} = S \times H \times \rho \times (S_n \times P_n + S_p \times P_p) \quad (19)$	<p>$V_{\text{生物}}$ 为草地生物体内参与营养元素循环的总价值, C_n 为草地生物质中含 N 元素的百分比, C_p 为草地生物质中含 P 元素的百分比, P_n、P_p 分别对应 N、P 的市场价格; $V_{\text{土壤}}$ 为草地土壤库中营养物质保持的总价值, S_n 为草地土壤库中含 N 元素的百分比; S_p 为草地土壤库中含 P 元素的百分比。</p>	土地利用数据、方瑜等 ^[48]
V_5	$V_{\text{环境}} = \sum_{i=1}^n S \times (U_i \times P_i) \quad (20)$	<p>$V_{\text{环境}}$ 为草地环境净化总价值, U_i 为第 i 种污染物的净化效率, P_i 为第 i 种环境污染物的净化市场价格。</p>	土地利用数据、董李霞 ^[49]

U_1 : 森林涵养水源价值 Water conservation value of forest; U_2 : 森林保育土壤价值 Soil conservation value of forest; U_3 : 森林固碳释氧价值 Carbon fixation and oxygen released value of forest; U_4 : 森林积累营养物质价值 Nutrient accumulation value of forest; U_5 : 森林净化大气环境价值 Atmosphere environmental purification value of forest; U_6 : 森林生物多样性保护价值 Species conservation value of forest; V_1 : 草地涵养水源价值 Water conservation value of grassland; V_2 : 草地土壤保持价值 Soil conservation value of grassland; V_3 : 草地固碳释氧价值 Carbon fixation and oxygen released value of grassland; V_4 : 草地营养物质保持价值 Nutrient accumulation value of grassland; V_5 : 草地环境净化价值 Environmental purification value of grassland

$$\sigma T = \left[1 + \exp\left[\frac{-220000 + 710(T_s + 273.16)}{8.314(T_s + 273.16)}\right] \right]^{-1} \quad (26)$$

$$\sigma E = 0.611 \left[\exp\left(\frac{17.27(T_s - 273.2)}{T_s - 35.86}\right) - \exp\left(\frac{17.27(T_d - 273.2)}{T_d - 35.86}\right) \right] \quad (27)$$

式中, NPP 为净初级生产力, FPAR 表示草所吸收的光合有效辐射比例, PAR 为到达地表的光合有效辐射, ε^* 是植物的最大光能利用率, 根据 Running 等^[52]对植被的模拟结果对草地的模拟结果, 草地最大光能利用率取值 0.608g/MJ, 森林取值 1.106g/MJ; σT 为温度对植物生长的影响系数, σE 为大气水分含量对植物生长的影响系数; FPAR 根据比值植被指数(VI)计算, $FPAR_{\max} = 0.950$, $FPAR_{\min} = 0.001$ ^[32], VI_{\max} 和 VI_{\min} 分别表示植被最大和最小比值植被指数, VI 由 NDVI 计算得到; PAR 是指绿色植物吸收的太阳辐射中使叶绿素分子呈激发状态的那部分光谱能量, Q 为太阳总辐射, a 和 b 是常数(取 $a=0.248$, $b=0.752$); S 为日照百分率, 由月日照百分率数据插值得到; Q_0 为最大晴天总辐射量, 由地理纬度 φ 、海拔高度 H 及地面水汽压 e 估算得到, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为常数, 取值参见文献^[53]; σT 由地表温度 T_s 按式(26)计算得到; σE 由地表温度按式(27)计算得到, T_d 为近地层露点温度。

2.2.2 土壤侵蚀模数计算

土壤侵蚀模数是计算林草生态系统保育土壤价值中的重要参数, 潜在土壤侵蚀模数是指在无植被覆盖条件下(裸地)的土壤侵蚀量, 现实土壤侵蚀模数是现实的植被覆盖条件下的土壤侵蚀量。计算公式如下^[55]。

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (28)$$

$$R = 0.043 p^{1.61} \quad (29)$$

$$\begin{cases} S = 10.80 & \sin\theta + 0.03\theta < 5^\circ \\ S = 16.80 & \sin\theta - 0.505^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ S = 21.91 & \sin\theta - 0.96\theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (30)$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \begin{cases} m = 0.5 & \tan\theta > 0.05 \\ m = 0.4 & 0.03 < \tan\theta \leq 0.05 \\ m = 0.3 & 0.01 < \tan\theta \leq 0.03 \\ m = 0.2 & \tan\theta \leq 0.01 \end{cases} \quad (31)$$

式中, A 为年土壤侵蚀模数; R 为降雨侵蚀因子, 并通过伍育鹏等^[56]的研究方法, 由公式(29)计算, 其中 p 为年降雨量(mm), 年降雨量数据由气象监测展点数据空间插值得到; K 为土壤可蚀性因子, 采用童李霞^[49]的取值 0.2519; L 、 S 为坡长因子、坡度因子, 根据魏兰香等^[57]的研究方法, 由利用 DEM、坡度数据根据公式(30)、(31)计算, 式中 S 为坡度因子值(无量纲); L 为坡长因子值(无量纲); θ 为坡度值($^\circ$); λ 为水平坡长值(m); m 为坡长指数(无量纲); C 为植被覆盖因子, 由植被覆盖度计算得到, 植被覆盖度参考肖骁等^[58]计算方法; P 为水土保持措施因子, 取值为 1^[49]。

3 结果与分析

3.1 林草生态系统调节服务功能价值

2015 年黄河中上游流域林草生态系统调节服务功能总价值为 18997.69 亿元, 单位面积林草生态系统产生的生态服务功能价值量为 395.54 万元/ km^2 。既有研究结果显示, 黄河中上游流域 GDP 总量为 6.95 万亿元^[59], 林草生态系统价值量相当于 GDP 的 27.33%。森林生态系统提供的涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护六项服务功能价值为 11833.11 亿元, 单位林地面积价值量为 1131.87 万元/ km^2 。草地生态系统提供的涵养水源、水土保持、固碳释氧、营养物质保持、环境净化、废弃物降解等五项服务功能价值为 7164.58 亿元(表 3), 单位草地面积价值量为 190.67 万元/ km^2 。森林生态系统价值量最大的是保育土壤功能(6756.10 亿元), 最小的是积累营养物质功能(273.35 亿元), 标准差是

2208.65 亿元;草地生态系统价值量最大的是固碳释氧功能(4170.42 亿元),最小的是环境净化功能(30.10 亿元),标准差是 1690.58 亿元。森林和草地均在保育土壤方面具有较高价值,森林在生物多样性保护、净化大气环境等方面具有优势,草地在固碳释氧、营养物质保持方面具有优势。

表 3 2015 年黄河中上游林草生态系统各项服务功能价值与组成

Table 3 Forest and grassland ecosystem service values and components in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

森林生态系统服务功能价值 Value of forest ecosystem service function			草地生态系统服务功能价值 Value of grassland ecosystem service function		
功能 Function	价值/亿元 Value	占比/% Proportion	功能 Function	价值/亿元 Value	占比/% Proportion
积累营养物质 Nutrient accumulation	273.35	2.31	营养物质保持 Nutrient conservation	2667.75	37.24
固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release	701.18	5.93	固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release	4170.42	58.21
涵养水源 Water conservation	644.72	5.45	涵养水源 Water conservation	113.85	1.59
保育土壤 Conservation of soil	6756.10	57.09	土壤保持 Soil conservation	182.46	2.55
净化大气环境 Purifying the atmosphere	1706.54	14.42	环境净化 Environmental purification	30.10	0.42
生物多样性保护 Biodiversity conservation	1751.22	14.80			
小计 Subtotal/亿元	11833.11		小计	7164.58	
合计 Total/亿元				18997.69	

从价值区间上看,每平方千米林草生态系统生态服务总价值介于 75.74 万元到 1417.66 万元之间(图 1),表明具有较强的空间差异;青海东部、甘肃南部、陕西中部、山西西部以及河南西部的单位面积林草价值量较高,一般在 760 万元/km² 以上,主要为祁连山、阿尼玛卿山、吕梁山以及秦岭山地。内蒙古南部、宁夏大部、甘肃中部以及黄河源部分地区为价值量低值区,大多数在 350 万元/km² 以下。从行政单元上看,(1)省域尺度

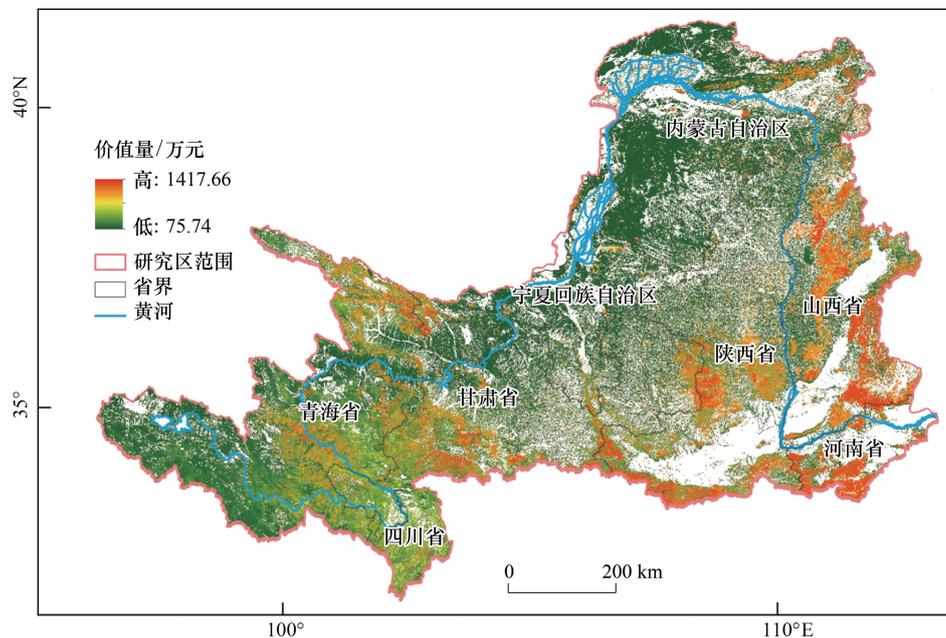


图 1 2015 年黄河中上游流域林草生态系统服务功能总价值空间分布

Fig.1 Spatial distribution of total value of forest and grassland ecosystem services in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

上林草生态系统服务功能价值总量排名依次是青海、山西、甘肃、陕西、内蒙、河南、四川。各省每平方千米林草生态价值量变化规律为河南(917.72 万元)>山西(700.90 万元)>陕西(500.46 万元)>四川(446.93 万元)>甘肃(384.90 万元)>青海(355.84 万元)>宁夏(193.96 万元)>内蒙古自治区(188.13 万元);(2) 市级尺度上,林草生态价值最大值在青海省果洛藏族自治州(1519.21 亿元)、最小值在河南省平顶山市(1225 万元),中位数在甘肃省兰州市(189.96 亿元)。每平方千米价值量最大值为河南省南阳市(1295.98 万元)、最小值为内蒙古自治区乌海市(114.96 万元),中位数所在城市为内蒙古自治区乌兰察布市(480.52 万元)。

3.2 森林生态系统调节服务功能价值

森林生态系统服务功能价值集中在青海东部、甘肃西南部、陕西中部,这些地区也是黄河中上游流域有林地的主要聚集区(图 2)。有林地的价值量最高,达到 1281.59 万元/km²;疏林地和灌木林的价值量均值分别为 1167.56 万元/km² 和 1078.27 万元/km²。森林生态系统调节服务价值量的高低主要取决于有林地土壤侵蚀模数、土壤容重、净生产力以及年物种损失机会成本等评估参数。利用分区统计方法计算不同森林类型的土壤侵蚀模数的结果表明:有林地土壤侵蚀模数最低,且土壤容重等其他生态参数最高,其所提供的生态功能价值最高。研究区灌木林面积最大,生态价值总量居于首位,为 5155.23 亿元,有林地和疏林地的价值贡献分别为 4706.78 亿元和 1921.81 亿元。

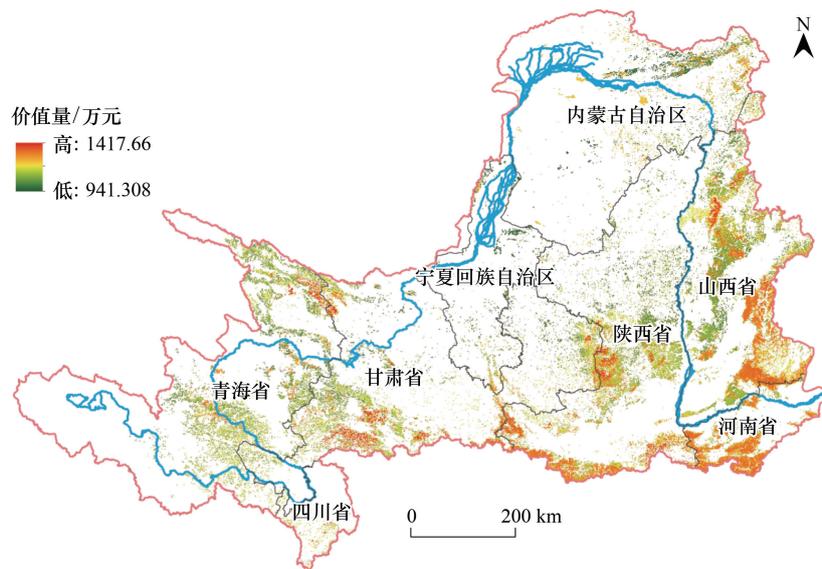


图 2 2015 年黄河中上游流域森林生态系统服务功能总价值空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of total value of forest ecosystem services in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

3.3 草地生态系统调节服务功能价值

草地生态系统服务功能价值集中在黄河上游的青海东部、四川北部、甘肃西部以及黄河中游的陕西西部,涉及祁连山区、阿尼玛卿山、黄土高原部分地区(图 3)。根据每种草地提供的生态系统服务功能价值均值和总量可知,高覆盖度草地的价值均值最高(264.79 万元/km²),中覆盖度草地和低覆盖度草地价值均值分别为 185.15 万元/km² 及 151.88 万元/km²。草地生态系统服务功能价值量与草地净生产力、草地土壤侵蚀模数以及所在地区降雨量密切相关,高覆盖度草地比中低覆盖度草地具有更高的净生产力和最低的土壤侵蚀量。中覆盖度草地的面积最大,价值量占比为 44.44%,高、低覆盖度草地价值占比为 29.38%和 26.18%。

3.4 森林生态系统各类调节服务功能价值空间格局

将林草生态系统服务价值按不同服务功能进行统计,并以栅格像元为最小单位进行空间可视化表达(图 4)。综合发现,森林生态系统的各项服务功能价值分布上具有差异化特征。其中,保育土壤、净化大气环境

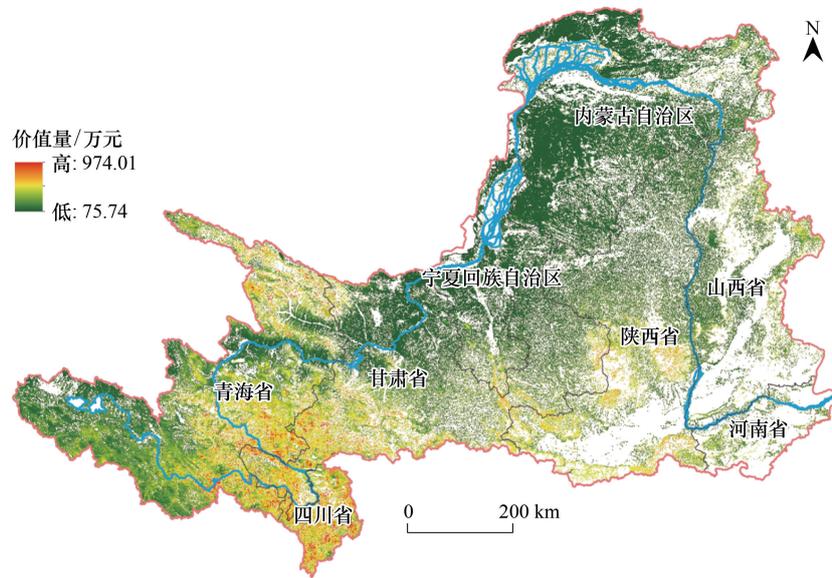


图3 2015年黄河中上游流域草地生态系统服务功能总价值空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of total value of grassland ecosystem services in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

的单位面积价值分布有“东部高于西部、南部高于北部”的明显趋势,这与不同林地类型的分布密切相关。有林地单位面积保育土壤价值和净化大气环境价值分别为 711.47 万元/ km^2 、169.52 万元/ km^2 ,均高于灌木林 (641.01 万元/ km^2 、167.62 万元/ km^2) 和疏林地 (641.92 万元/ km^2 、168.38 万元/ km^2),东南部的太岳山、吕梁山西部、秦岭北麓地区地处半湿润气候区,林地分布广泛且林分以天然林和人工林为主。反观西部的黄土高原甘肃段、青海阿尼玛卿山麓等地区以及西北部的祁连山脉,有林地面积和聚集度均不及东南部,因此东部林地比西部林地产生较高的保育土壤和净化大气环境价值;而涵养水源、固碳释氧、积累营养物质单位面积价值的高值区呈现东、西两翼的分布态势,即“青海-甘肃”与“陕西-山西”两个高值区,这是气候、海拔以及地理纬度等因素综合作用的结果。

3.5 草地生态系统各类调节服务功能价值空间格局

草地生态系统涵养水源、土壤保持功能价值量均呈现“南高北低”的空间格局,高值区分布在四川邛崃山北麓、甘肃陕西南部的秦岭北麓,涵养水源价值达到 6 万元/ km^2 以上,土壤保持价值达到了 70 万元/ km^2 以上(图 5)。涵养水源价值自南向北梯式递减,这与降雨量的空间态势相吻合。而土壤保持价值量自南向北则是骤减,除在甘肃南部、陕西南部存在东西连片窄条状的过度带外,北部的鄂尔多斯高原、黄土高原、河套平原、宁夏平原等大部分地区草地土壤保持价值低于 10 万元/ km^2 ,这些地区由于深居内陆,气候干旱,草地覆盖度较低,致使土壤侵蚀量较高,是全域土壤保持价值的低值区。草地固碳释氧与营养物质保持价值高值区集中在黄河上游的甘南草原、阿尼玛卿山、祁连山南麓、湟水谷地等高海拔连片地带,单位面积草地提供的固碳释氧价值高达 400.85 万元/ km^2 以上,营养物质保持价值高达 73.73 万元/ km^2 以上。黄河中游草地面积较大,但大部分草地固碳释氧与营养物质保持价值偏低,单位面积草地提供的固碳释氧价值低至 153.17 万元/ km^2 以下,营养物质保持价值低至 71.54 万元/ km^2 以下。陕西南部受到南水北调、水源涵养地等政策因素形成了局部高值区,其固碳释氧价值达到 300 万元/ km^2 以上,营养物质保持价值达到 72 万元/ km^2 以上。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

基于多源空间信息数据,利用空间统计分析技术,评估了 2015 年黄河中上游流域像元级林草生态调节服

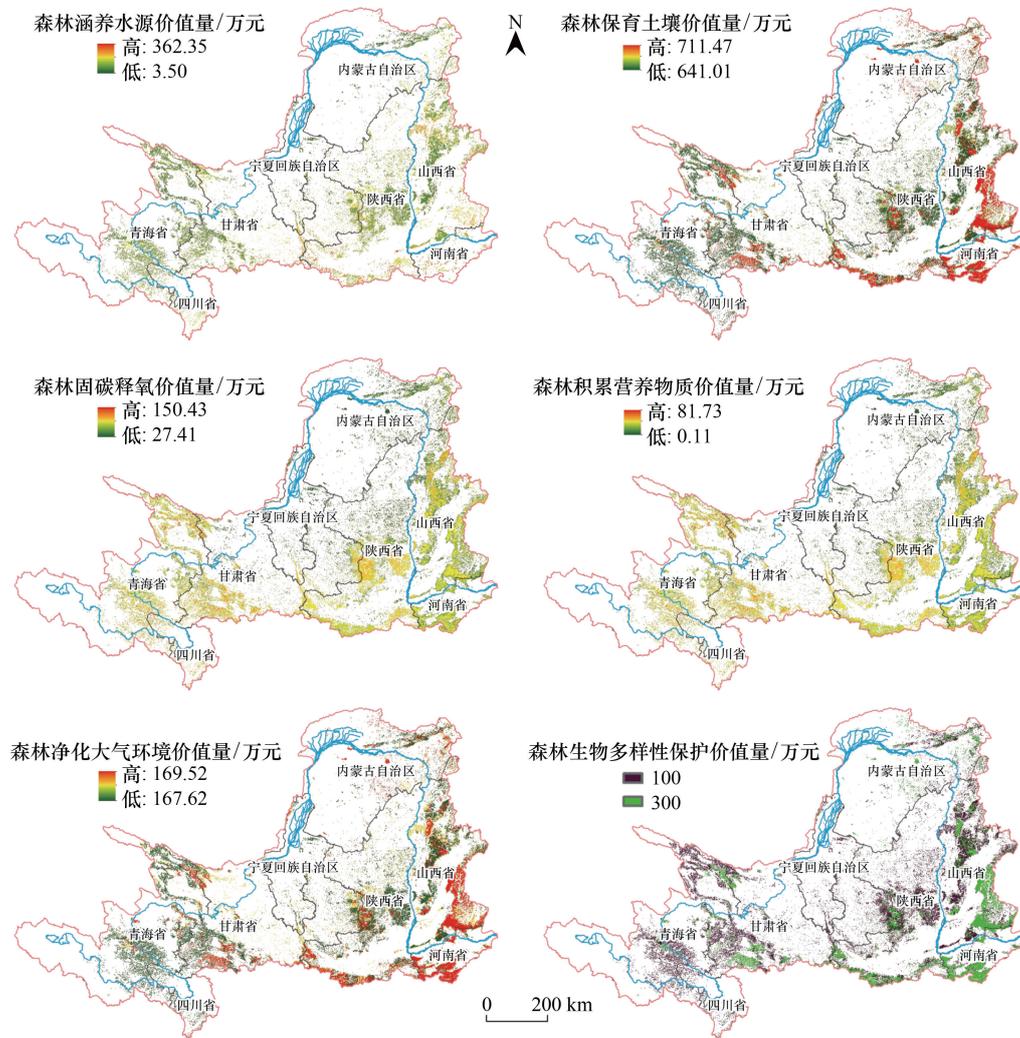


图 4 2015 年黄河中上游流域森林生态系统服务功能价值空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of functional value of forest ecosystem services in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

务功能价值量以及空间格局与区划特征。主要得出以下结论:

(1)集成运用土地利用数据、遥感产品数据、气象数据以及统计监测数据,参考联合国千年评估框架、《规范》以及既有研究,通过反演 NPP、土壤侵蚀模数等生态参数数据,构建了 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 网格尺度林草生态系统调节服务功能价值评估体系,克服了传统研究根据实地采样监测数据以点带面估算价值量存在精确度不足的缺点,弥补了传统统计调查数据受限于特定行政单元的局限,发现整个流域范围内生态价值量的微观空间异质性特征,为开展系统性、整体性以及协同性区域生态保护和治理提供科学依据。在 GIS 分区统计技术的支持下,该方法体系支持省、市行政单元生态价值的核算,有利于各级行政部门制定生态环境治理对策;支持不同林分区域、不同密度草地、不同海拔以及气候带等自然单元价值量核算,为探究生态服务价值空间差异的形成机制以及差异化生态补偿机制制定提供参考。

(2)2015 年黄河中上游流域林草生态调节服务功能价值为 18997.69 亿元,其中森林提供 11833.11 亿元,草地提供 7164.58 亿元。单位面积林草生态系统服务价值具有较强的空间异质性,高值区集中在青、甘、陕、山四省连片区域,主要受到祁连山、阿尼玛卿山、秦岭山地等水热条件的影响作用,而内蒙古南部、宁夏大部、甘肃中部以及青海河源区由于受降水、地形、地貌等因素的影响,单位面积林草生态价值较低。有林地和高覆盖度草地单位面积生态服务价值最高,但对全域生态服务价值贡献最大的是灌木林与中覆盖度草地;

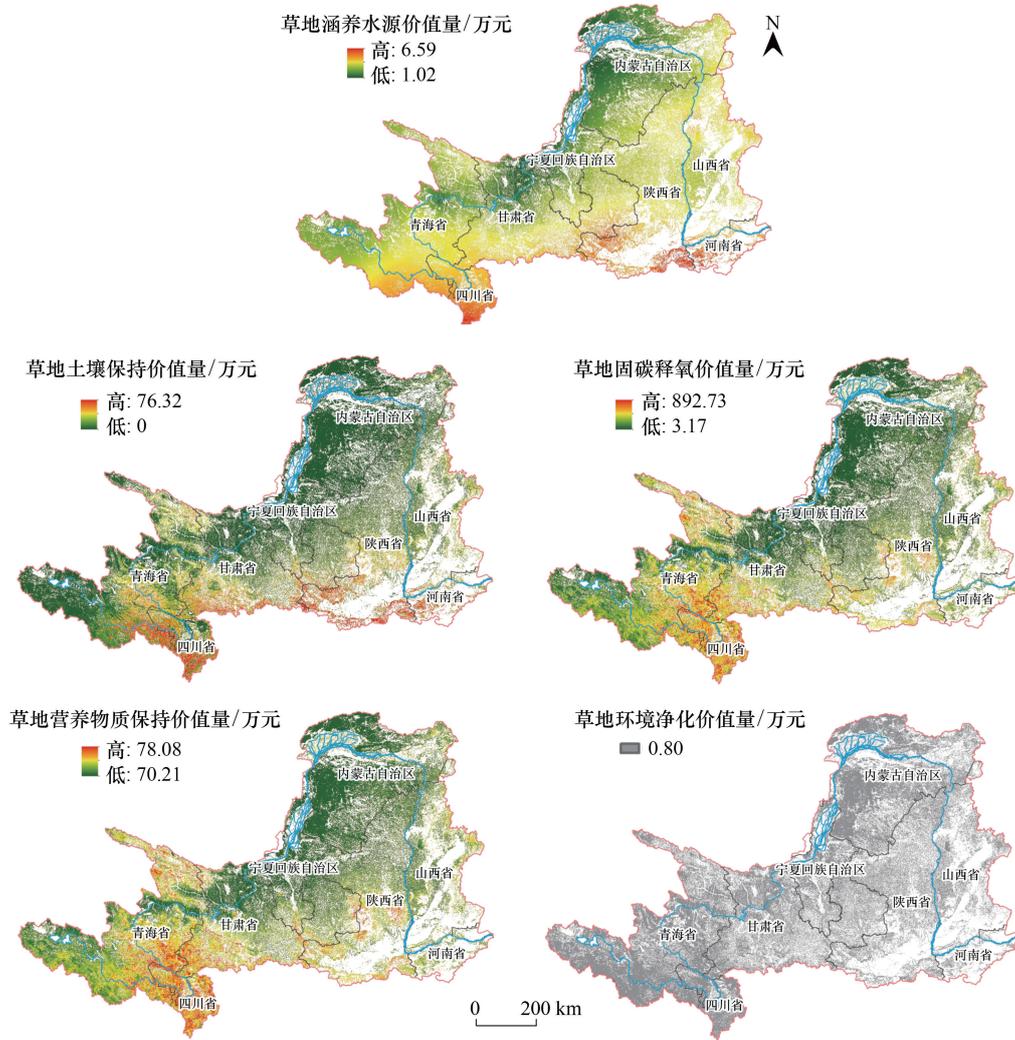


图 5 2015 年黄河中上游流域草地生态系统服务功能价值空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of functional value of grassland ecosystem services in the upper and middle reaches of the Yellow River in 2015

(3) 森林生态系统的 6 项调节服务功能价值量均呈现西部青海甘肃、中北部宁夏内蒙、东部陕西山西等三大区域空间分布特征,保育土壤、净化大气环境的单位面积价值的空间分布有东南高于西北态势,而涵养水源、固碳释氧、积累营养物质的单位面积价值的高值聚集区分为东、西两翼,这与有林地空间分布以及 NPP 等生态参数值的影响。草地涵养水源、土壤保持价值呈现“南高北低”的空间格局,与降雨量等气候因素密切相关,草地固碳释氧与营养物质保持价值高值区集中在黄河上游高海拔地带。

4.2 讨论

实施黄河流域生态保护与高质量发展战略,不仅要维系林草生态服务功能,还要依托生态产品优势促进经济增长。在当前阶段,在落实生态保护和高质量发展的背景下,必须要着力于两个关键问题以构建高质量发展动力系统,一是在生态保护中推进高质量发展,努力探索在“绿水青山”的保护、修复、重建过程中实现区域生态恢复与产业高质量发展的协同效应,推动整个社会生态系统的革新与优化;二是统筹当前和未来一段时期的生态政策、扶贫政策、产业政策等并通过政策之间的整合、融合以实现创新机制与模式的目的,突破目前在发展中存在的环境生态桎梏。

因此,一是不同生态服务功能形成的空间区域特征表明:流域各省份应该根据当地各项生态服务功能价值的差异与优势,突出生态功能区域空间特征,实施“系统性、整体性、协同性”的生态保护与治理策略。四

川、青海、甘肃等上游流域是流域重要的水源涵养区和补给区,应严格落实国家主体功能区战略,保护三江源、祁连山、甘南草原等林草生态功能区,推进天然林与人工林保护、退牧还草、地震灾后植被恢复等重点生态工程,不断提升水源涵养能力;甘肃、宁夏、山西、陕西的黄土高原丘陵沟壑区水沙关系不协调易引发洪涝灾害,鉴于林草生态系统具有强大的水土保持功能,不同林分和草地覆盖度的土壤保持价值各异。应在该区域增加林草植被覆盖度,并将水土流失预防重点由以往的增加林草地面积为主向复合生态修复转变,例如实施树种结构调整、森林抚育、封育提升等工程^[37];

二是利用精细空间的生态服务价值估算结果,摸清生态产品家底,掌握生态产品清单,明晰生态服务与产品的空间位置及存在形态,创新建立生态系统服务价值实现机制。在黄河上中游流域探索林草生态效益精准量化补偿、自然资源资产负债表、绿色碳库功能生态效益交易价值化等生态服务价值的就地实现路径^[60];对于生态系统服务产生的区域之外的价值,尝试建立迁地实现路径,按照“谁受益谁补偿”的原则,探索建立可量化计算的上下游生态补偿办法,例如黄河上游涵养水功能的价值化实现需要在中游予以体现,黄河中游的保育土壤功能的价值化实现需要在下游予以体现;

三是要打好生态产品组合拳,着力构建精准化的生态产业体系,通过生态产业化、产业生态化战略,促进生态价值与经济价值的持续稳定协同增长。提炼林草调节服务价值转化途径与渠道,评估各区域生态服务及产品的开发潜力,因地制宜发展生态旅游、生态农业、生态制造业、生态服务业和生态高新技术产业,全面提高生态产品的生产水平和供给能力。例如,上游青海、四川等生态功能区在保证生态功能的同时可通过发挥资源优势,建立国家公园为主体的生态旅游产业,构建绿色农牧产业体系和产品品牌;中游河套灌区、汾渭平原粮食主产区应通过产业分工与协同,推动产业结构升级提升农产品数量和质量。

参考文献 (References):

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. (2019- 10- 15) [2019- 12-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1647443445350748172&wfr=spider&for=pc>, 2019-09- 18.
- [2] 纪秋磊, 梁伟, 傅伯杰, 吕一河, 严建武, 张为彬, 金朝, 兰志洋. 基于 Google Earth Engine 与复杂网络的黄河流域土地利用/覆被变化分析. 生态学报, 2022(06): 1-14.
- [3] 王会肖, 覃龙华. 黄河中上游河道生态水短缺价值损失探讨. 地理研究, 2007, 26(1): 29-36.
- [4] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, Wu D T, Fu G, Zhao Y T, Sun P L. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region; a case study in the Yellow River Basin. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142480.
- [5] 李恩平. 生态文明开辟黄河中上游流域经济地理新空间. 中国发展观察, 2020, (19/20): 17- 18, 21-21.
- [6] Small N, Munday M, Durance I. The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits. *Global Environmental Change*, 2017, 44: 57-67.
- [7] Woldeyohannes A, Cotter M, Biru W D, Kelboro G. Assessing changes in ecosystem service values over 1985 - 2050 in response to land use and land cover dynamics in Abaya-Chamo Basin, Southern Ethiopia. *Land*, 2020, 9(2): 37.
- [8] Cao T G, Yi Y J, Liu H X, Xu Q, Yang Z F. The relationship between ecosystem service supply and demand in plain areas undergoing urbanization: A case study of China's Baiyangdian Basin. *Journal of Environmental Management*, 2021, 289: 112492.
- [9] 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.
- [10] Lerouge F, Gulinck H, Vranken L. Valuing ecosystem services to explore scenarios for adaptive spatial planning. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 30-40.
- [11] Ma G X, Wang J N, Yu F, Yang W S, Ning J, Peng F, Zhou X F, Zhou Y, Cao D. Framework construction and application of China's Gross Economic-Ecological Product accounting. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 109852.
- [12] 刘耕源, 杨青, 黄俊勇. 黄河流域近十五年生态系统服务价值变化特征及影响因素研究. 中国环境管理, 2020, 12(3): 90-97.
- [13] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997: 2-30.
- [14] 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.
- [15] Sala O E, Paruelo J M. Ecosystem services in grasslands//Daily G C, ed. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997: 237-249.

- [16] Pearce D W. The economic value of forest ecosystems. *Ecosystem Health*, 2001, 7(4): 284-296.
- [17] van der Plas F, Ratcliffe S, Ruiz-Benito P, Scherer-Lorenzen M, Verheyen K, Wirth C, Zavala M A, Ampoorter E, Baeten L, Barbaro L, Bastias C C, Bauhus J, Benavides R, Benneter A, Bonal D, Bouriaud O, Bruelheide H, Bussotti F, Carnol M, Castagneyrol B, Charbonnier Y, Cornelissen J H C, Dahlgren J, Checko E, Coppi A, Dawud S M, Deconchat M, De Smedt P, De Wandeler H, Domisch T, Finér L, Fotelli M, Gessler A, Granier A, Grossiord C, Guyot V, Haase J, Hättenschwiler S, Jactel H, Jaroszewicz B, Joly F X, Jucker T, Kambach S, Kaendler G, Kattge J, Koricheva J, Kunstler G, Lehtonen A, Liebergesell M, Manning P, Milligan H, Müller S, Muys B, Nguyen D, Nock C, Ohse B, Paquette A, Peñuelas J, Pollastrini M, Radoglou K, Raulund-Rasmussen K, Roger F, Seidl R, Selvi F, Stenlid J, Valladares F, van Keer J, Vesterdal L, Fischer M, Gamfeldt L, Allan E. Continental mapping of forest ecosystem functions reveals a high but unrealised potential for forest multifunctionality. *Ecology Letters*, 2018, 21(1): 31-42.
- [18] Logsdon R A, Omani N, Raj C, Chaubey I, Srinivasan R. The future of ecosystem services in the upper mississippi river basin//Proceedings of the 1st Climate Change Symposium: Adaptation and Mitigation. Chicago Illinois, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, 2015: 1-2.
- [19] Frélichová J, Vačkář D, Pártl A, Loučková B, Harmáčková Z V, Lorencová E. Integrated assessment of ecosystem services in the Czech Republic. *Ecosystem Services*, 2014, 8: 110-117.
- [20] 房学宁, 赵文武. 生态系统服务研究进展——2013 年第 11 届国际生态学大会 (INTECOL Congress) 会议述评. *生态学报*, 2013, 33(20): 6736-6740.
- [21] Lara A, Little C, Urrutia R, McPhee J, Álvarez-Garretón C, Oyarzún C, Soto D, Donoso P, Nahuelhual L, Pino M, Arismendi I. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(4): 415-424.
- [22] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [23] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. *地理研究*, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [24] Xie G D, Zhen L, Lu C X, Xiao Y, Li W H. Applying value transfer method for eco-service valuation in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1): 51-59.
- [25] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [26] 陈颖, 孙勇, 曾冠岚, 刘森. 辽河保护区草地生态系统服务功能间接价值评估. *生态科学*, 2015, 34(1): 103-109.
- [27] 肖骁, 穆治霖, 赵雪雁, 李京忠, 薛冰. 基于 RS/GIS 的东北地区森林生态系统服务功能价值评估. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3298-3304.
- [28] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [29] Yin D Y, Li X S, Li G E, Zhang J, Yu H C. Spatio-temporal evolution of land use transition and its eco-environmental effects: a case study of the Yellow River Basin, China. *Land*, 2020, 9(12): 514.
- [30] 周德成, 罗格平, 许文强, 冯异星. 1960—2008 年阿克苏河流域生态系统服务价值动态. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 399-408.
- [31] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [32] 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.
- [33] 娄佩卿, 付波霖, 刘海新, 高二涛, 范冬林, 唐廷元, 林星辰. 锡林郭勒盟草地生态系统服务功能价值动态估算. *生态学报*, 2019, 39(11): 3837-3849.
- [34] 韦惠兰, 祁应军. 森林生态系统服务功能价值评估与分析. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 74-82.
- [35] Chi Y, Shi H H, Zheng W, Sun J K, Fu Z Y. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the Yellow River Delta in the last 30 years. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 880-892.
- [36] 刘晶晶, 王静, 戴建旺, 翟天林, 李泽慧. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 148-161.
- [37] 河南日报. 生态保护与协同创新 助推黄河流域高质量发展. (2019-10-29)[2020-01-19]. <http://m.henan.gov.cn/2019/10-29/991240.html>.
- [38] 袁周炎妍, 万荣荣. 生态系统服务评估方法研究进展. *生态科学*, 2019, 38(5): 210-219.
- [39] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 38582-2020 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [40] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030 年). 北京: 黄河水利出版社, 2013: 1-10.
- [41] 徐新良, 庞治国, 于信芳. 土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用. 北京: 科学技术文献出版社, 2014: 10-13.
- [42] 四川省人民政府. 2015 年四川省水资源公报. [2021-10-21]. <http://slt.sc.gov.cn/scslt/szyzgwkg/2019/4/16/e67685e7d0154d66862bde9baec1c71c.shtml>.

- [43] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报 2017. [2021-10-21]. <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/2017szygb/index.html#p=1>.
- [44] 甘肃发展年鉴编委会. 2016 甘肃发展年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [45] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴 2016. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [46] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴 2016. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [47] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996(05): 497-508.
- [48] 方瑜, 欧阳志云, 肖焱, 郑华, 徐卫华, 白杨, 江波. 海河流域草地生态系统服务功能及其价值评估. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1694-1706.
- [49] 童李霞. 三江源区草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2017.
- [50] 郭生祥, 汪有奎, 张建奇. 甘肃祁连山国家级自然保护区天然林保护工程生态效益初步评价分析. 甘肃林业科技, 2012, 37(1): 21-25, 48-48.
- [51] 龙启德, 房林娜. 贵州省白云区林业自然资源资产价值量评估. 中国集体经济, 2016, (24): 15-18.
- [52] Running S W, Thornton P E, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system//Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, Howarth R W, eds. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer, 2000: 44-57.
- [53] 杨东辉. 基于 MODIS 数据的石羊河上游植被净第一性生产力变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2011.
- [54] 孔德昌, 董琼. 马关古林箐自然保护区森林生态系统服务功能价值评估. 林业调查规划, 2008, 33(2): 84-86.
- [55] 王顺利, 刘贤德, 王建宏, 李小兵, 赵志强. 甘肃省森林生态系统保育土壤功能及其价值评估. 水土保持学报, 2011, 25(5): 35-39.
- [56] 伍育鹏, 谢云, 章文波. 国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较. 水土保持学报, 2001, 15(3): 31-34.
- [57] 魏兰香, 曹广超, 曹生奎, 袁杰, 吴成永. 基于 USLE 模型的祁连山南坡土壤侵蚀现状评价. 武汉工程大学学报, 2017, 39(3): 288-295.
- [58] 肖骁, 李京忠, 韩彬, 逯承鹏, 薛冰. 东北老工业区植被覆盖度时空特征及城市化关联分析. 生态科学, 2017, 36(6): 71-77.
- [59] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 875-883.
- [60] 王兵, 牛香, 宋庆丰. 中国森林生态系统服务评估及其价值化实现路径设计. 环境保护, 2020, 48(14): 28-36.