

徐绮阳,王永瑜,杨燕燕.基于优化模型的甘肃省生态系统服务价值时空评估[J].中国沙漠,2023,43(2):53-64.

基于优化模型的甘肃省生态系统服务价值时空评估

徐绮阳,王永瑜,杨燕燕

(兰州财经大学 统计学院,甘肃 兰州 730020)

摘要:当前,生态系统服务价值评估模型在计量范围界定和方法适用性方面仍存在局限。基于“环境经济核算-生态系统核算”明确生态系统服务计量范围,采用修正的当量因子法,构建了优化的生态系统服务价值评估模型,评估并分析了2010—2018年甘肃省生态系统服务价值变化趋势及14个市州的空间分布特征。结果表明:(1)甘肃省土地利用结构以荒漠和草地为主,研究期内农田和荒漠面积减少,森林、草地和水域面积呈不同幅度增加趋势。(2)2010—2018年甘肃省生态系统服务价值的增加率为20.68%;水域、森林和草地生态系统服务价值呈增加趋势,农田和荒漠生态系统服务价值均不同程度减少;各单项生态系统服务功能价值均呈增加趋势。(3)甘肃省生态系统服务价值在空间上呈南多北少分布特征,2018年陇南市、甘南州和张掖市的单位面积生态系统服务价值在全省位居前三。(4)甘肃省生态系统服务稀缺性问题越来越突出,各市州生态系统服务价值相对于社会经济价值的稀缺程度差异明显。以此优化模型对生态系统服务价值进行综合时空评估,可为甘肃省乃至黄河流域生态补偿和生态产品价值实现提供一定的决策依据。

关键词:生态系统服务价值;计量范围;修正方法;优化模型;甘肃省

文章编号: 1000-694X(2023)02-053-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00119

中图分类号: F062.2

文献标志码: A

0 引言

生态系统服务作为连接自然生态系统与社会经济系统的利益流,为人类福祉带来了巨大贡献,但大多数生态系统服务价值难以通过市场反映,从而被人们忽视并造成严重的生态环境破坏^[1]。《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出,要“提升生态系统质量和稳定性”,并“坚持绿水青山就是金山银山理念”。因此,对生态系统服务价值进行科学评估,一方面可提高人们的生态环境保护意识,另一方面作为“绿水青山”向“金山银山”价值转化的关键环节,其评估结果可为生态保护补偿和生态产品价值实现等提供重要的科学依据。

国内外学者在评估生态系统服务方面展开了大量研究^[2-8],主要涉及土地利用/土地覆盖变化对

生态系统服务价值的影响^[9-10]、可持续发展目标下生态系统服务的权衡分析^[11]等。其中有关生态系统服务价值评估的主流方法为功能价值法和当量因子法两类^[12]。后者鉴于数据需求少、简单易操作而被广泛应用^[13]。Costanza等^[14]基于当量因子法提出了生态系统服务价值评估模型,获得普遍认可^[15-18]。但谢高地等^[19-20]认为,Costanza等的评估模型由于低估或忽略了某些服务价值而限制了其在中国的直接运用,并结合中国生态系统类型和特征对该模型进行修正,建立了符合中国实际的生态系统服务价值评估体系,在国内相关领域得到了广泛使用^[21-26]。彭文甫等^[27]采用谢高地等提出的生态系统服务价值评估方法,分析研究了四川省基于土地利用的生态系统服务价值。盛晓雯等^[28]参考谢高地等构建的当量因子表,对京津冀地区生态系统服

收稿日期:2022-03-20; 改回日期:2022-08-02

资助项目:国家社会科学基金一般项目(22BTJ002);兰州财经大学科研创新团队支持计划项目(2020LC03);兰州财经大学博士研究生科研创新重点项目(2021D04)

作者简介:徐绮阳(1988—),女,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事生态价值核算研究。E-mail: xusaisai555@126.com

通信作者:王永瑜(E-mail: yongyu_wang@163.com)

务价值的时空差异进行研究并分析其对土地利用强度的敏感性。幸赞品等^[29]结合谢高地提出的价值当量换算方法,对1975—2015年甘肃省白龙江流域8个野生动物自然保护区的生态系统服务价值进行评估。

现有研究为省市域、流域或自然保护区等尺度的生态系统服务价值评估提供了重要的案例参考,并有学者从不同视角对评估方法进行了改进与修正。但总结已有研究,仍存在以下不足:①当量因子表使用版本较为陈旧。较多研究^[28,30-32]采用谢高地等2002年^[19]或2007年^[20]单位面积生态系统服务价值当量因子表,基于以上版本的测算结果在时间上已存在一定滞后性。②计量范围界定模糊。一些研究^[21-23]将作为最终生态系统服务中间投入的支持服务纳入计量范围,由于重复计算而高估了生态系统服务价值评估结果。③修正方法仍不完善。部分研究^[22,25]采用全国尺度的生态系统服务价值评估模型对某区域测算时,仅考虑当量因子的空间修正而未调整价值系数,或仅修正价值系数,当量因子仍采用全国水平,从而影响评估结果的准确性。因此,亟须明确界定生态系统服务价值评估的计量范围,充分考虑空间和价格因素以完善修正方法,进而对已有的生态系统服务价值评估模型进行优化。

“十四五”时期是推动黄河流域生态保护和高质量发展的关键期^[33],甘肃省是黄河上游重要的水源涵养区和补给区,是全国水土流失治理和防沙治沙的重点区域^[34]。当前甘肃省生态系统服务价值评估研究主要在某流域、单一城市或某生态功能区展开^[35-38],研究对象主要围绕某一类生态系统或某单项生态服务功能^[39-40]。本文通过对甘肃省生态系统服务价值进行省市域尺度、多生态系统类型及多项服务功能的综合时空评估,从而为甘肃乃至黄河流域生态补偿和生态产品价值实现提供一定的数据支撑和决策依据。

鉴于此,本文采用谢高地等^[41]最新版本的单位面积生态系统服务价值当量因子表,根据国际标准环境经济核算体系2012框架下的《环境经济核算—生态系统核算》(System of Environmental-Economic Accounting—Ecological Accounting,简称SEEA—EA)^[42],明确生态系统服务计量范围,在此基础上对全国尺度的当量因子和价值系数分别进行空间和价格修正,以此构建优化的生态系统服务价值评估模型,探讨甘肃省生态系统服务价值变动趋势及

各市州空间分布特征。

1 研究区概况

甘肃省(32°31′—42°57′N、92°13′—108°46′E)地处黄河流域上游,位于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原的交会地带。全省东西长约1 600 km,面积42.58万km²,辖12个地级市和2个自治州(图1)。

省内各地气候差别较大,年平均气温0~16℃,年降水量36.6~734.9 mm,降水多在6—8月,占全年降水量的50%~70%。2021年甘肃省GDP达10 243.3亿元,全省常住人口为2 490.02万人。甘肃省内生态系统类型多样,是《全国主体功能区规划》确定的“两屏三带”全国生态安全战略格局中“青藏高原生态屏障”“黄土高原—川滇生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分,其生态建设对黄河流域乃至全国的生态保护和高质量发展都具有重要意义^[34]。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

采用的2010—2018年各地类面积数据来源于甘肃省土地利用变更调查结果,粮食产量、粮食作物播种面积、农产品生产价格指数和GDP等数据来源于2011—2019年《中国统计年鉴》和《甘肃发展年鉴》,粮食作物净利润数据来源于2011—2019年《全国农产品成本收益资料汇编》。根据全国生态系统分类体系,为保证数据完整性,以森林—林地,草地—草地,水域—水域及水利设施用地,农田—耕地、园地及其他农用地,荒漠—未利用地的形式将生态系统类型与土地利用类型相对应。

2.2 生态系统服务计量范围界定

依据SEEA—EA对生态系统服务概念和计量范围的描述,生态系统服务是生态系统对经济体和其他人类活动利益的贡献^[42],概念化的生态系统服务即“最终生态系统服务”,包括供应服务、调节服务和文化服务。生态系统服务价值是特定时期内某区域所有生态系统提供最终生态系统服务的交换价值^[42],具体包括供应服务价值、调节服务价值和文化服务价值。而支持服务是生成最终生态系统服务的中间投入^[42],其价值已体现在最终生态系统服务转化为人收益的流量中,因此计量范围应

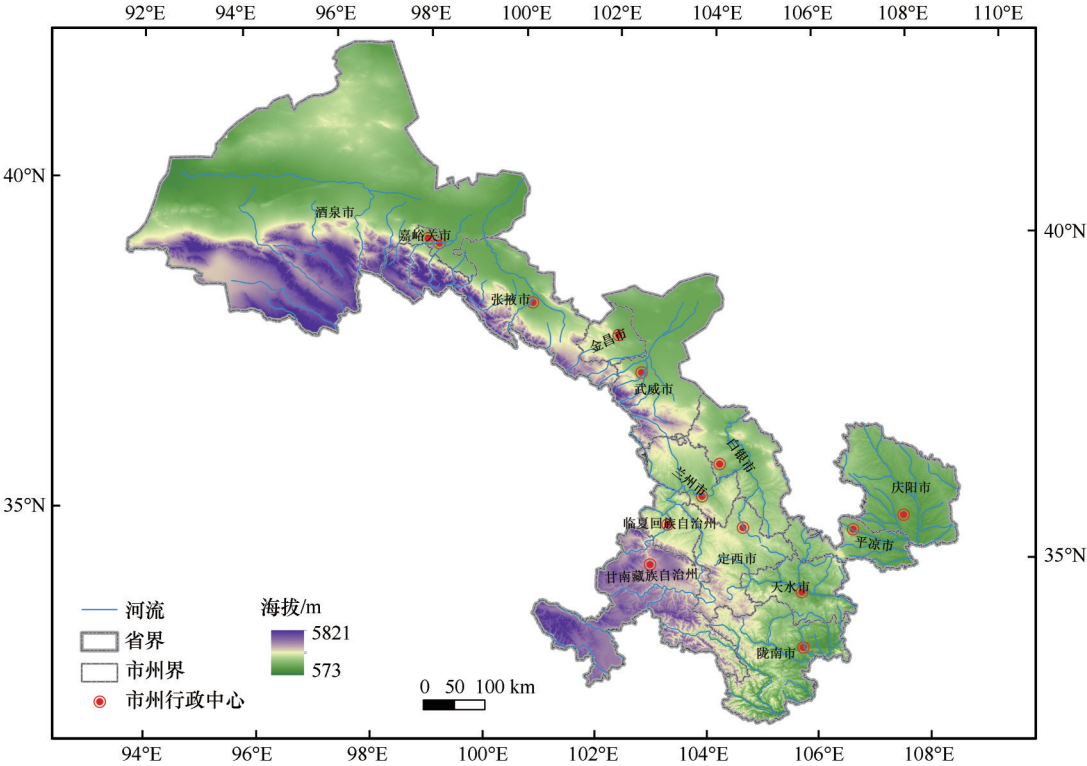


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

排除支持服务,以避免重复计算。

结合以上讨论,本研究参考谢高地等^[41]2010年当量因子表,对其中的服务类型适当调整。支持服务中的维持养分循环属于生态系统内部和生态系统之间的流量,同样是生成最终生态系统服务的中间投入;生物多样性一般被视为生态系统的特征而不是被人类生产生活所利用的生态系统服务^[42];土壤保持原本属于支持服务范畴,但鉴于甘肃省为全国水土流失治理和防沙治沙的重点区域,土壤保持服务评估尤为重要,因此本研究将其记录为由土壤提供的调节服务。此外,参考 Costanza 等^[14-15]生态系统服务价值研究及谢高地等^[41]提出的单位面积价值当量因子表,假设建设用地的生态系统服务价值为零,并在后续分析中省略。最终经调整的生态系统服务计量范围包括供应服务、调节服务和文化服务3大类及9小类生态系统服务类型(表1)。

2.3 土地利用动态度分析

土地利用动态度指某研究区在一定时间范围内某种土地利用类型的面积变化情况^[43],本文以土地利用面积变化量和土地利用动态度作为相应生态系统面积变化情况的分析依据。

表 1 调整后的生态系统服务计量范围

Table 1 Adjusted ecosystem service measurement range

一级分类	二级分类
供应服务	食物生产
	原材料生产
	水资源供给
调节服务	气体调节
	气候调节
	净化环境
	水文调节
	土壤保持
文化服务	美学景观

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$
 (1)

式中: K 为研究期内某种土地利用类型的动态度,即该地类面积的年变化率(%); U_a 和 U_b 为研究期初和期末该地类面积(hm^2); T 为该地类面积变化年份。

2.4 生态系统服务价值评估方法修正

2.4.1 当量因子修正

由于生态系统服务价值存在空间异质性,为使

评估结果更接近研究区实际,需对基于全国尺度的生态系统服务价值当量因子表进行空间修正。结合研究区实际情况,参照徐丽芬等^[44]以农田为基准的地区修正方法,用研究区与全国农田单位面积粮食产量的比值对当量因子进行修正。

$$\lambda = \frac{Q}{Q_0} \quad (2)$$

$$E_{ij} = \lambda \times E_{0ij} \quad (3)$$

式中: λ 为当量因子修正系数; Q 为研究区某研究期内平均每年单位面积粮食产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Q_0 为全国该研究期内平均每年单位面积粮食产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); E_{ij} 为第*i*类土地利用类型第*j*项生态服务功能修正后的当量因子; E_{0ij} 为第*i*类土地利用类型第*j*项生态服务功能全国尺度的当量因子。根据表1和公式(2)~(3),最终确定甘肃省 λ 的值为0.7225,单位面积生态系统服务价值当量因子如表2所示。

表2 甘肃省单位面积生态系统服务价值当量因子

Table 2 Equivalent factors of ecosystem service value per unit area in Gansu Province

服务功能类型		生态系统类型				
		森林	草地	水域	农田	荒漠
供给服务	食物生产	0.18	0.17	0.32	0.80	0.00
	原材料生产	0.42	0.25	0.18	0.18	0.01
	水资源供给	0.22	0.14	3.14	-0.94	0.01
调节服务	气体调节	1.38	0.87	0.69	0.64	0.05
	气候调节	4.12	2.30	1.55	0.34	0.04
	净化环境	1.21	0.76	2.24	0.10	0.15
	水文调节	2.70	1.69	32.18	1.08	0.09
	土壤保持	1.68	1.06	0.78	0.38	0.05
文化服务	美学景观	0.67	0.43	1.62	0.05	0.02

2.4.2 价值系数修正

谢高地等^[41]将农田生态系统单位面积粮食生产的净利润作为一个标准当量因子的价值量,即生态系统服务的标准价值系数,该方法已将人力资本等投入从中剔除,因此评估结果可较好地反映生态系统通过自身功能为经济体和其他人类活动提供的生态系统服务价值,从而为当地生态保护和生态补偿等提供决策依据。该评估模型中的农田生态系统粮食生产价值依据全国三大主要粮食作物即稻谷、小麦、玉米的播种面积和单位面积平均净利润确定^[41]。参考以上方法,根据研究区主要粮食作物实际情况对标准价值系数进行修正,同时考虑每

年粮食作物的播种面积和价格会因自然条件和市场因素等产生一定波动,因此引入农产品生产价格指数对各年价值量作进一步调整,最终以研究期粮食净利润的年平均值作为标准当量因子的价值量。

$$D = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (S_t^w \times F_t^w + S_t^c \times F_t^c + S_t^i \times F_t^i) / r_t \quad (4)$$

式中: D 为研究区标准当量因子的价值($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$);研究区三大主要粮食作物为小麦、玉米和薯类, S_t^w 、 S_t^c 和 S_t^i 分别表示第*t*年研究区小麦、玉米和薯类的播种面积在总播种面积中的占比(%); F_t^w 、 F_t^c 和 F_t^i 分别表示第*t*年全国小麦、玉米和薯类的单位面积平均净利润($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$); r_t 为以研究期期初年为基年的第*t*年农产品生产价格指数,本研究期初为2010年, $n=9$,经计算,最终确定甘肃省的*D*值为1 654.11 $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.5 生态系统服务价值评估优化模型

基于修正的单位面积生态系统服务价值当量因子表和标准价值系数,最终根据式(5)计算得到研究区生态系统服务价值系数表,研究区生态系统服务价值可根据式(6)和式(7)由价值系数和各类生态系统面积确定。

$$VC_{ij} = D \times E_{ij} \quad (5)$$

$$ESV_i = A_i \times \sum_{j=1}^9 VC_{ij} \quad (6)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^5 ESV_i \quad (7)$$

式中: VC_{ij} 为第*i*类生态系统第*j*类服务功能价值系数($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$); A_i 为第*i*类生态系统的面积(hm^2); ESV_i 为第*i*类生态系统的服务价值(元); ESV 为研究区总生态系统服务价值(元)。

3 结果与分析

3.1 甘肃省土地利用变化特征

甘肃省土地利用结构以荒漠(未利用地)和草地(草地)为主,二者面积之和占总面积的69%以上,其次分别为森林(林地)、农田(耕地、园地及其他农用地)及水域(水域及水利设施用地,表3)。2010—2018年甘肃省土地利用变化情况表现为农田和荒漠面积减少,森林、草地和水域面积均有不同程度的增加趋势。其中,农田和荒漠面积分别减少47.87万 hm^2 和130.93万 hm^2 ,土地利用动态度分别为-5.98%和-16.37%;森林、草地和水域面积分别

表 3 2010—2018 年甘肃省土地利用面积及动态度
Table 3 Land use area and dynamic attitude in Gansu Province from 2010 to 2018

生态系统类型		森林	草地	水域	农田	荒漠
土地利用类型		林地	草地	水域及水利 设施用地	耕地、园地及 其他农用地	未利用地
面积/万 hm ²	2010 年	518.46	1 410.96	2.88	611.06	1618.09
	2015 年	609.92	1 419.37	74.76	563.21	1488.06
	2018 年	609.58	1 417.23	74.73	563.19	1487.16
面积占比/%	2010 年	12.46	33.91	0.07	14.68	38.88
	2015 年	14.68	34.16	1.80	13.55	35.81
	2018 年	14.68	34.13	1.80	13.56	35.82
变化量/万 hm ²	2010—2015 年	91.46	8.41	71.88	-47.85	-130.03
	2015—2018 年	-0.34	-2.14	-0.03	-0.02	-0.9
	2010—2018 年	91.12	6.27	71.85	-47.87	-130.93
土地利用 动态度/%	2010—2015 年	18.29	1.68	14.38	-9.57	-26.01
	2015—2018 年	-0.11	-0.71	-0.01	-0.01	-0.30
	2010—2018 年	11.39	0.78	8.98	-5.98	-16.37

增加 91.12 万 hm²、6.27 万 hm² 和 71.85 万 hm²，土地利用动态度分别为 11.39%、0.78% 和 8.98%。

研究期内各土地利用类型变化情况存在明显差异，减幅最大的为荒漠和农田，增幅最大的为森林和水域。根据甘肃省土地利用变更调查数据显示，研究期内农田面积减少主要由于甘肃省退耕还林还草工程成效显著；荒漠面积大幅减少则与甘肃省荒漠化、石漠化综合治理成效密不可分；在退耕还林还草和草原退化生态治理政策带动下，甘肃省森林和草地面积于 2013 年显著上升，2010—2015 年森林面积增加 91.46 万 hm²，土地利用动态度为 18.29%，草地面积增加 8.41 万 hm²，土地利用动态度为 1.68%，2015—2018 年二者均有小幅减少趋势，须加大政策实施力度以避免面积发生持续下降；水域面积虽在总土地利用面积中占比较小，但在研究期内增幅显著，2010—2015 年面积增加 71.88 万 hm²，土地利用动态度为 14.38%，2015—2018 年基本保持不变。由此可见，随着近年来积极推动黄河流域生态保护和高质量发展，甘肃省流域治理与生态环境保护工作在这一阶段成效显著。

3.2 甘肃省基于土地利用的生态系统服务价值变化

3.2.1 单位面积生态系统服务价值系数表

甘肃省单位面积生态系统服务价值系数水域>森林>草地>农田>荒漠(表 4)。从各类生态系统各

单项服务价值系数来看，甘肃省水域生态系统的水文调节、水资源供给和净化环境服务价值系数较高，森林和草地生态系统的气候调节、水文调节和土壤保持服务价值系数较高，农田生态系统的水文调节、食物生产和气体调节服务价值系数较高，荒漠生态系统则是净化环境、水文调节和土壤保持服务价值系数较高。

由此表明，甘肃省作为黄河流域沿线九省(区)之一，以及国家生态安全战略格局中重要生态屏障的组成部分，其水域、森林和草地生态环境的保护与修复对全省生态系统质量提升发挥重要作用，农田生态系统在保障食物供给服务的前提下，注重控制农业耗水、化肥使用等对生态环境带来的负面影响，荒漠生态系统的防风固沙等综合治理力度应继续稳步加强。

3.2.2 各地类生态系统服务价值动态变化特征

研究期内甘肃省 *ESV* 总值整体呈增加趋势，从 2010 年的 3 264.33 亿元增加到 2018 年的 3 939.33 亿元，增长率为 20.68%(表 5)。其中，水域、森林和草地生态系统 *ESV* 呈增加趋势，而农田和荒漠生态系统 *ESV* 均呈不同程度减少趋势。水域生态系统 *ESV* 增幅最大，2010—2015 年增加率高达 2 495.83%，这与 2013 年甘肃省水域面积大幅增加直接相关，2015—2018 年水域生态系统 *ESV* 基本保持不变；森林生态

表 4 甘肃省生态系统服务价值系数(元·hm⁻²)

Table 4 Ecosystem service value coefficient (RMB·hm⁻²) in Gansu Province

服务功能类型		生态系统类型				
		森林	草地	水域	农田	荒漠
供给服务	食物生产	301.76	278.86	521.86	1 320.58	5.98
	原材料生产	693.15	410.32	290.81	292.80	17.93
	水资源供给	358.53	227.07	5 194.68	-1 559.60	11.95
调节服务	气体调节	2 279.64	1 442.08	1 135.34	1 063.63	77.68
	气候调节	6 821.00	3 812.35	2 561.49	555.72	59.75
	净化环境	1 998.80	1 258.83	3 708.78	161.34	244.99
	水文调节	4 463.68	2 792.54	53 221.54	1 786.67	143.41
	土壤保持	2 775.61	1 756.79	1 290.70	621.45	89.63
文化服务	美学景观	1 108.45	705.11	2 673.03	89.63	35.85
合计		20 800.62	12 683.94	70 598.21	4 332.22	687.18

表 5 2010—2018 年甘肃省各地类生态系统服务价值(ESV)与贡献率

Table 5 The value and contribution rate of ecosystem services in Gansu Province from 2010 to 2018

ESV 相关指标		生态系统类型					合计
		森林	草地	水域	农田	荒漠	
ESV/亿元	2010 年	1 078.43	1 789.65	20.33	264.72	111.19	3 264.33
	2015 年	1 268.67	1 800.32	527.79	243.99	102.26	3 943.03
	2018 年	1 267.96	1 797.61	527.58	243.99	102.19	3 939.33
变化量/亿元	2010—2015 年	190.24	10.67	507.46	-20.73	-8.94	678.70
	2015—2018 年	-0.71	-2.71	-0.21	-0.01	-0.06	-3.70
	2010—2018 年	189.54	7.95	507.25	-20.74	-9.00	675.00
变化率/%	2010—2015 年	17.64	0.60	2 495.83	-7.83	-8.04	20.79
	2015—2018 年	-0.06	-0.15	-0.04	0.00	-0.06	-0.09
	2010—2018 年	17.58	0.44	2 494.79	-7.83	-8.09	20.68
贡献率/%	2010 年	33.04	54.82	0.62	8.11	3.41	100
	2015 年	32.17	45.66	13.39	6.19	2.59	100
	2018 年	32.19	45.63	13.39	6.19	2.59	100

系统 *ESV* 在 2010—2015 年期间增加率为 17.64%，2015—2018 年期间基本不变；草地生态系统 *ESV* 在两个时段内先增后减，整体呈小幅增加趋势，2010—2015 年增加率为 0.6%，2015—2018 年减少率为 0.15%；农田和荒漠生态系统 *ESV* 均有不同程度减少趋势，其中荒漠生态系统 *ESV* 减幅较大，2010—2015 年减少率为 8.04%，2015—2018 年基本保持不变；农田生态系统 *ESV* 在 2010—2015 年减少率为 7.83%，2015—2018 年期间保持不变。

在 *ESV* 构成中，草地生态系统的贡献最大，这主要由于甘肃省内草地的面积和价值系数占较大优

势，草地生态系统 *ESV* 贡献率于 2010 年高达 54.82%，2015 年和 2018 年的贡献率虽在各类生态系统中位居首位但呈小幅减少趋势；其次为森林生态系统，由于具有较高的价值系数，2010—2018 年的 *ESV* 贡献率均在 33% 左右；水域生态系统虽在总面积中占比最小，但其价值系数最高，同时由于 2013 年其面积明显增加，水域生态系统在 2015 年和 2018 年的 *ESV* 贡献率均在 13% 左右；农田生态系统的面积占比和价值系数均不占突出优势，因此其 *ESV* 贡献率小于以上三类生态系统，并在 2010—2018 年呈小幅减少趋势。荒漠生态系统的面积占比较大，但由

于其价值系数远远小于其他生态系统,在面积和价值系数二者共同作用下,*ESV*贡献率最低,同时由于研究期内面积减少,荒漠生态系统在2015年和2018年的*ESV*贡献率相比2010年有所下降。

3.2.3 各单项功能生态系统服务价值动态变化特征

2010—2018年,甘肃省各单项功能生态系统服务价值整体呈不同程度增加趋势(表6)。各类生态系统服务功能中占主导地位的为调节服务,约占总*ESV*的88%,其次为供给服务和文化服务,分别占总*ESV*的7%和5%左右,研究期内三大类功能服务的*ESV*占比基本保持不变。其中,调节服务中的水文调节和气候调节服务价值较高,分别占总服务价值的30%和25%左右,5种调节服务中价值增幅最大的为水文调节,2010—2018年增长率为53.60%;供

给服务中的食物生产和原材料生产服务价值较高,而价值增幅最大的为水资源供给,从2010年的-41.24亿元增加到2018年的6.80亿元,增加率为116.48%,说明各类生态系统特别是农田生态系统的耗水问题明显改善;文化服务主要为美学景观服务,该服务价值在总价值中占比较小,在水域、森林和草地生态系统面积及价值系数的共同作用下,美学景观服务价值在2010—2018年呈增加趋势,增加率为17.07%。整体来看,价值占比较大的水文调节和气候调节服务等对甘肃省生态系统质量起重要作用,2010—2018年增幅较大的分别为水资源供给、水文调节、美学景观和净化环境服务,说明甘肃省在水资源消耗、水环境保护、自然景观维护 and 环境污染治理等方面成效显著。

表 6 2010—2018年甘肃省各单项功能生态系统服务价值(*ESV*)与占比

Table 6 Value and proportion of individual ecosystem services in Gansu Province from 2010 to 2018

服务功能类型		<i>ESV</i> /亿元			<i>ESV</i> 变化率/%	<i>ESV</i> 占比/%		
		2010年	2015年	2018年	2010—2018年	2010年	2015年	2018年
供给服务	食物生产	136.80	137.15	137.08	0.20	4.19	3.48	3.48
	原材料生产	114.71	121.85	121.73	6.13	3.51	3.09	3.09
	水资源供给	-41.24	6.87	6.80	116.48	-1.26	0.17	0.17
	小计					6.44	6.74	6.74
调节服务	气体调节	399.55	423.68	423.28	5.94	12.24	10.74	10.74
	气候调节	935.91	1 016.48	1 015.42	8.49	28.67	25.78	25.78
	净化环境	331.81	373.86	373.48	12.56	10.16	9.48	9.48
	水文调节	773.15	1 188.46	1187.54	53.60	23.68	30.14	30.15
	土壤保持	444.63	476.63	476.15	7.09	13.62	12.09	12.09
	小计					88.38	88.23	88.23
文化服务	美学景观	169.00	198.05	197.85	17.07	5.18	5.02	5.02
合计		3 264.33	3 943.03	3 939.33	20.68	100	100	100

3.3 甘肃省生态系统服务价值空间分布特征

2018年,甘肃省生态系统服务总价值*ESV*为3 893.82亿元(不包含中牧山丹马场、太子山天然林和莲花山风景林保护区),空间上呈南多北少分布特征。如表7所示,2018年酒泉市、甘南州和张掖市提供的*ESV*分别为931.37亿元、540.50亿元和463.30亿元,分别占甘肃省*ESV*总值的23.92%、13.88%和11.90%,三市州的*ESV*总和约占全省的50%。根据计算结果可以看出,各市州的生态系统服务价值占比情况与其土地利用结构一致。

为使各市州*ESV*具有可比性,本研究进一步计

算单位面积*ESV*对各市州生态系统服务价值进行比较(表7)。整体来看,陇南市森林生态系统提供的*ESV*(327.53亿元)远高于其他市州,甘南州的草地(294.86亿元)和森林(217.14亿元)生态系统,以及张掖市的草地(253.98亿元)、水域(113.17亿元)和森林(77.30亿元)生态系统*ESV*相对较高,因此在上述各类生态系统价值系数的带动下(森林、草地和水域生态系统价值系数较高),以上三市州的单位面积*ESV*在全省位居前三(陇南市15 530.82元·hm⁻²,甘南州14 879.08元·hm⁻²,张掖市12 945.09元·hm⁻²),生态系统服务状况较好(图2)。

表 7 2018 年甘肃省各市州生态系统服务价值(ESV/亿元)
Table 7 Ecosystem service value of cities and states in Gansu Province in 2018

地区	生态系统类型					合计	ESV 占比 /%	单位面积 ESV /(元·hm ⁻²)
	森林	草地	水域	农田	荒漠			
兰州市	21.92	96.17	8.61	12.52	0.40	139.62	3.59	11 419.93
嘉峪关市	0.23	0.96	1.13	0.43	0.60	3.35	0.09	3 130.99
金昌市	22.59	18.61	10.24	4.84	2.36	58.64	1.51	8 087.83
白银市	22.26	127.45	13.06	22.93	1.83	187.53	4.82	9 736.58
天水市	108.41	18.68	9.81	25.64	0.51	163.07	4.19	12 087.85
武威市	76.92	124.47	26.76	19.70	8.91	256.76	6.59	8 175.36
张掖市	77.30	253.98	113.17	13.88	4.98	463.30	11.90	12 945.09
平凉市	87.32	12.61	8.12	19.23	0.39	127.67	3.28	12 383.86
酒泉市	24.30	560.83	255.42	11.67	79.15	931.37	23.92	5 581.26
庆阳市	159.73	129.93	7.55	30.91	0.46	328.59	8.44	12 721.15
定西市	81.00	65.41	15.18	35.00	0.82	197.41	5.07	10 647.90
陇南市	327.53	47.54	17.86	27.24	0.73	420.90	10.81	15 530.82
临夏州	16.27	31.18	15.04	12.28	0.37	75.13	1.93	11 007.74
甘南州	217.14	294.86	22.03	5.79	0.68	540.50	13.88	14 879.08

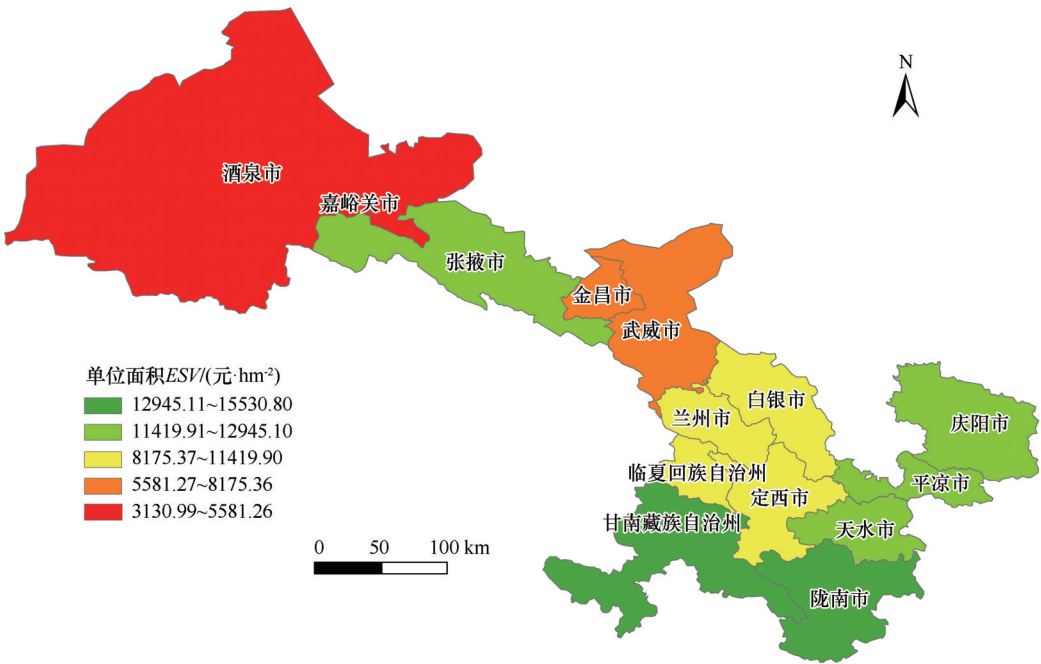


图 2 2018 年甘肃省单位面积生态系统服务价值空间分布格局
Fig.2 Spatial distribution pattern of ecosystem service value in Gansu Province in 2018

3.4 甘肃省生态系统服务价值与 GDP 对比情况

3.4.1 甘肃省人均生态系统服务价值与人均 GDP

2010 年甘肃省生态系统服务总价值 *ESV* 为 3 264.33 亿元,人均 *ESV* 为 12 751.39 元,人均 *ESV* 和

人均 GDP 的比值为 0.83(图 3)。如图 3 所示,2010—2018 年人均 *ESV* 和人均 GDP 的比值逐渐下降,2018 年二者比值下降至 0.49,表明甘肃省生态系统服务总价值 *ESV* 在研究期内虽明显增加,但在当前经济快速发展、生态环境资源有限的情况下,全省

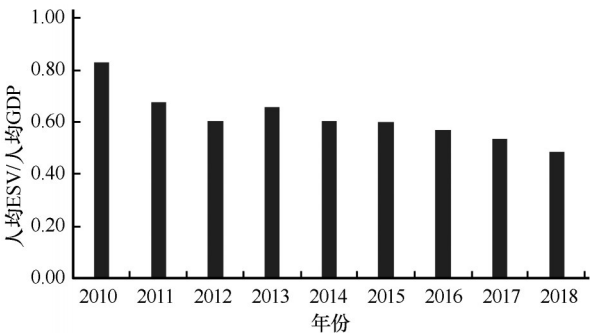


图3 2010—2018年甘肃省人均生态系统服务价值ESV与人均GDP比值

Fig.3 Ratio of ESV and GDP per capita in Gansu Province from 2010 to 2018

生态系统服务的稀缺性问题正变得越来越突出,生态保护与建设面临更为严峻的形势和挑战。

3.4.2 各市州人均生态系统服务价值与人均GDP

2018年甘肃省各市州人均ESV与人均GDP比值具有明显空间差异(表8)。其中,比值最大的为

甘南州,其2018年人均ESV为72 201.95元,与人均GDP的比值为3.47,丰富的水资源以及大面积的湿地、草地和森林为该地区贡献了较高的生态系统服务价值。

酒泉市的人均ESV与人均GDP比值排在第二位(1.56),祁连山的冰川与水源涵养功能等为该市贡献了较高的生态系统服务价值。张掖市的水源涵养功能区、陇南市的水土保持与生物多样性生态功能区同样为两市贡献了较大的生态系统服务价值,两市人均ESV和人均GDP的比值分别为1.14和1.11。由于以上各区域均为国家重点生态功能区和甘肃省限制开发区域,当地功能定位以生态保护为主,因此生态系统服务价值相对大于其社会经济价值。而作为甘肃省重点开发区域的兰州市、嘉峪关市等,由于经济发展水平较高、人口密度较大,而价值系数较高的生态系统类型用地面积较少,导致这些城市的生态系统服务价值相对其社会经济价值高度稀缺(图4)。

表8 2018年甘肃省各市州人均生态系统服务价值ESV与人均GDP
Table 8 Per capita ESV and per capita GDP in Gansu Province in 2018

地区	ESV/亿元	GDP/亿元	总人口	人均ESV/元	人均GDP/元	人均ESV/人均GDP
兰州市	139.62	2 732.94	3 284 678	4 250.65	83 202.59	0.05
嘉峪关市	3.35	299.62	208 295	1 606.87	143 844.06	0.01
金昌市	58.64	264.24	453 842	12 920.08	58 223.04	0.22
白银市	187.53	511.60	1 817 450	10 318.12	28 149.16	0.37
天水市	163.07	652.05	3 719 380	4 384.20	17 531.26	0.25
武威市	256.76	469.27	1 894 482	13 552.81	24 770.11	0.55
张掖市	463.30	407.71	1 310 897	35 342.58	31 101.35	1.14
平凉市	127.67	395.17	2 341 758	5 451.68	16 874.72	0.32
酒泉市	931.37	596.89	1 017 031	91 577.54	58 689.17	1.56
庆阳市	328.59	708.15	2 699 848	12 170.58	26 229.25	0.46
定西市	197.41	356.26	3 042 661	6 488.14	11 708.86	0.55
陇南市	420.90	379.23	2 881 567	14 606.66	13 160.45	1.11
临夏州	75.13	255.35	2 406 886	3 121.37	10 609.10	0.29
甘南州	540.50	155.73	748 591	72 201.95	20 802.63	3.47

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文采用最新版本的单位面积生态系统服务价值当量因子表,根据联合国最新发布的SEEA—EA明确生态系统服务计量范围,对全国尺度的当

量因子和价值系数分别进行空间和价格修正,以此构建了优化的生态系统服务价值评估模型,解决了以往研究中存在的当量因子表使用版本陈旧、计量范围模糊、修正方法不完善等问题。研究区测算结果验证了该优化模型的准确性和普适性,可为完善生态系统服务价值评估理论与方法体系提供借鉴,并为甘肃省乃至黄河流域生态补偿和生态产品价

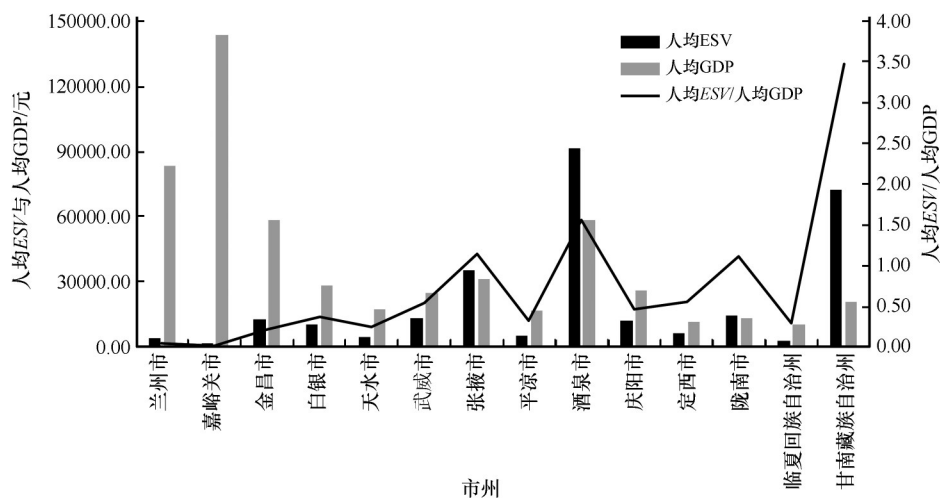


图4 2018年甘肃省各市州人均ESV与人均GDP比值

Fig.4 Ratio of *ESV* and GDP per capita in Gansu Province in 2018

值实现提供重要的数据支撑。

生态系统服务在不同区域存在一定差异,应用于不同研究区时应对应当量因子进行空间修正。但由于数据获取困难,本研究未对甘肃省各市州的单位面积生态系统服务价值当量因子一一进行测算,而均采用全省尺度的当量因子表进行价值评估,未来研究中将通过实地调查和监测获取更为精细的基础数据。虽然当前测算结果可能在一定程度上不能真实准确地反映各市州生态系统服务状况,但仍可以为省内各区域及黄河流域沿线城市的生态环境保护提供相应决策依据。

4.2 结论

甘肃省土地利用类型以荒漠和草地为主,占总面积的70%左右。2010—2018年农田和荒漠面积减少,森林、草地和水域面积均呈不同程度的增加趋势,这与近年来甘肃退耕还林还草工程和荒漠化、草原退化生态综合治理成效密不可分。

从生态系统服务价值变化情况来看,2010—2018年甘肃省ESV总值的增加率为20.68%。其中,水域、森林和草地生态系统ESV呈增加趋势,农田和荒漠生态系统ESV呈不同程度减少趋势。研究期内各单项服务功能价值整体呈增加趋势,三大类生态系统服务功能按ESV占比大小排序为调节服务>供给服务>文化服务,其中调节服务价值约占总价值的88%,森林、草地和水域生态系统是影响调节服务的主要生态系统类型。

从空间分布情况来看,甘肃省生态系统服务价值呈南多北少分布特征,各市州生态系统服务价值

占比情况与其土地利用结构一致。在生态系统面积和价值系数共同作用下,2018年陇南市、甘南州和张掖市的单位面积ESV在全省位居前三。

从与GDP对比情况来看,甘肃省人均ESV与人均GDP比值总体呈下降趋势,说明研究期内甘肃省生态系统服务价值虽显著增加,伴随社会经济快速发展,生态系统服务的稀缺性问题正变得越来越突出。2018年各市州人均ESV与人均GDP比值差异明显,作为国家重点生态功能区和省限制开发区域的甘南州、酒泉市、张掖市和陇南市比值较大,其生态系统服务价值相对大于其社会经济价值,而作为省重点开发区域的兰州市、嘉峪关市等,生态系统服务价值相对其社会经济价值则高度稀缺。

总体来说,甘肃省应继续加强土地综合治理,减少森林、草地、水域等生态或农业用地向荒漠等非农用地转变。在生态环境方面,加大区域内山水林田湖草沙的一体化保护和修复力度,重点关注水域生态系统特别是黄河上游重要支流流域的健康管理,以保证水文调节、气候调节、土壤保持等服务功能持续发挥重要作用,促进黄河“净水长流”。此外,随着城市化进程的不断推进,对重点开发区要加强大气污染管控、城区污水及废弃物排放处理和排放控制,尤其黄河流域沿线城市亟须根据实际情况调整产业布局,通过多元化的生态补偿提高上游区域生态保护积极性,同时应积极探索重点生态功能区的生态产品价值实现路径,促进各区域生态环境保护与经济高质量发展。

参考文献：

- [1] 殷楠,王帅,刘焱序.生态系统服务价值评估:研究进展与展望[J].生态学报,2021,40(1):233-244.
- [2] 刘志涛,王少剑,方创琳.粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J].地理学报,2021,76(11):2797-2813.
- [3] 李骊,张青青,王雅梅,等.2000—2018年克孜河流域生态系统脆弱性、服务功能价值及风险评价[J].中国沙漠,2021,41(2):164-172.
- [4] 姜晗,吴群.基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2712-2725.
- [5] 张杰,李清泉,吴祥苗,等.基于土地利用的粤港澳大湾区生态系统服务价值及承载力演变分析[J].生态学报,2021,41(21):8375-8386.
- [6] 曾晨,李扬镡,段雪雯,等.长江流域中部地区生态系统服务价值评估与综合驱动力分析[J].水土保持研究,2022,29(2):362-371.
- [7] Hardaker A, Pagella T, Rayment M. Integrated assessment, valuation and mapping of ecosystem services and disservices from upland land use in Wales [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101098.
- [8] Petway J R, Lin Y P, Wunderlich R F. A place-based approach to agricultural non-material intangible cultural ecosystem service values [J]. *Sustainability*, 2020, 12: 699.
- [9] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [10] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.
- [11] Deng X Z, Li Z H, John G. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 953-968.
- [12] 李鲁冰,林文鹏,任晨阳,等.两种生态系统服务价值评估方法的比较研究:以环杭州湾地区为例[J].水土保持研究,2022,29(3):228-234,243.
- [13] 韩梦涛,涂建军,徐桂萍,等.黄河流域水域生态系统服务与经济发展时空协调性[J].中国沙漠,2021,41(4):167-176.
- [14] Costanza R, D' Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [15] Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [16] Song X P. Global estimates of ecosystem service value and change: taking into account uncertainties in satellite-based land cover data [J]. *Ecological Economics*, 2018, 143: 227-235.
- [17] Vardon M, Keith H, Lindenmayer D. Accounting and valuing the ecosystem services related to water supply in the central highlands of Victoria, Australia [J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39(10): 1-12.
- [18] Xi H H, Cui W L, Cai L, et al. Evaluation and prediction of ecosystem service value in the Zhoushan island based on LUCC [J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 1-13.
- [19] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [20] 谢高地,甄霖,鲁春霞.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [21] 蒋小荣,李丁,李智勇.基于土地利用的石羊河流域生态服务价值[J].中国人口·资源与环境,2010,20(6):68-73.
- [22] 周晨,丁晓辉,李国平,等.南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究:以生态系统服务价值为视角[J].资源科学,2015,37(4):792-804.
- [23] 张家其,杨贺菲,田亚平,等.基于生态系统服务功能价值的湖北省恩施地区生态补偿研究[J].水土保持通报,2016,36(5):214-219.
- [24] 刘祥鑫,蒲春玲,刘志有,等.区域耕地生态价值补偿量化研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):84-90.
- [25] 朱治州,钟业喜.长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.
- [26] 雷燕慧,丁国栋,李梓萌,等.京津风沙源治理工程区土地利用/覆盖变化及生态系统服务价值响应[J].中国沙漠,2021,41(6):29-40.
- [27] 彭文甫,周介铭,杨存建.基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J].长江流域资源与环境,2014,23(7):1053-1062.
- [28] 盛晓雯,曹银贵,周伟,等.京津冀地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].中国农业资源与区划,2018,39(6):79-86.
- [29] 幸赞品,颜长珍,冯坤.1975—2015年甘肃省白龙江流域自然保护区生态系统服务价值及其时空差异[J].中国沙漠,2019,39(3):172-182.
- [30] 宋佳楠,梅建屏,金晓斌.基于协调系数修正的区域生态系统服务价值测算研究[J].地理与地理信息科学,2010,26(1):86-89.
- [31] 肖红克,李洪忠,王莉.粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化:以广佛肇为例[J].水土保持研究,2020,27(1):290-297.
- [32] 赵世宽,郭鹏飞,杨玉玲.生态系统服务价值测算:以重庆市为例[J].统计与决策,2021,37(4):104-107.
- [33] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[R].2021-03-13.
- [34] 牛叔文,李永华,马利邦,等.甘肃省主体功能区划中生态系统重要性评价[J].中国人口·资源与环境,2009,19(3):119-124.
- [35] 张学斌,石培基,罗君.基于生态系统服务价值变化的生态经济协调发展研究:以石羊河流域为例[J].中国沙漠,2014,34(1):268-274.

- [36] 石惠春,师晓娟,刘鹿.兰州城市生态系统服务价值评估方法与结果比较[J].中国人口·资源与环境,2013,23(2):30-35.
- [37] 马利邦,牛叔文,杨丽娜,等.敦煌市生态系统服务价值评估及区域可持续发展研究[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):294-300.
- [38] 申建秀,王秀红,刘羽.退耕还林前后甘肃正宁县生态系统服务价值的时空变化特征[J].水土保持研究,2012,19(4):59-64.
- [39] 靳芳,张振明,余新晓.甘肃祁连山森林生态系统服务功能及价值评估[J].中国水土保持科学,2005,3(1):53-57.
- [40] 谢余初,巩杰,齐姗姗.甘肃白龙江流域生态系统粮食生产服务价值时空分异[J].生态学报,2017,37(5):1719-1728.
- [41] 谢高地,张彩霞,张雷明.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [42] United Nations, et al. System of Environmental-economic Accounting: Ecosystem Accounting[M]. New York, USA: United Nations, 2021.
- [43] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):83-89.
- [44] 徐丽芬,许学工,罗涛.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[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.

Spatio-temporal evaluation of ecosystem service value in Gansu Province based on optimization model

Xu Qiyang, Wang Yongyu, Yang Yanyan

(School of Statistics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: There are still limitations in the measurement scope and applicability of current ecosystem service valuation models. Based on SEEA-EA, the scope of ecosystem service measurement was defined, and an optimized ecosystem service value assessment model was constructed by using the modified equivalent factor method. Taking Gansu Province as the study area, the trend of ecosystem service value changed from 2010 to 2018 and the spatial distribution characteristics of 14 cities and states in Gansu Province were evaluated and analyzed. The results showed that: (1) The land use structure of Gansu Province was dominated by desert and grassland. The area of farmland and desert decreased during the study period, while the area of forest, grassland and water area increased in different ranges. (2) The increase rate of ecosystem service value in Gansu Province from 2010 to 2018 was 20.68%. The ecosystem service value of water area, forest and grassland increased, while the ecosystem service value of cropland and desert decreased. The value of each individual ecosystem service showed an increasing trend. (3) The ecosystem service value of Gansu Province was more in the south and less in the north. The ecosystem service value per unit area of Longnan, Gannan and Zhangye ranked the top three in Gansu Province in 2018. (4) The scarcity of ecosystem services was becoming more and more prominent in Gansu Province, and the scarcity degree of ecosystem services value relative to socio-economic value varied significantly among cities and states. This optimization model can be used to carry out a comprehensive spatio-temporal evaluation of ecosystem service value, which can provide a certain decision basis for ecological compensation and value realization of ecological products in Gansu Province and even in the Yellow River Basin.

Key words: ecosystem service value; measurement range; correction method; optimization model; Gansu Province