

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.036.

曹倡景, 张璐, 梁通, 等. 黄河砒砂岩区土地利用生态系统服务价值响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 337-343.

Cao Changjing, Zhang Lu, Liang Tong, Zhang Pan, et al. Response to the Value of Land Use Ecosystem Services in the Sandstone Area of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 337-343.

黄河砒砂岩区土地利用生态系统服务价值响应

曹倡景¹, 张璐¹, 梁通¹, 张攀², 韩珈琦¹, 杨文杰¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: [目的] 探究生态系统服务价值对土地利用变化的响应并预测未来变化的趋势, 为砒砂岩区土地利用格局规划提供科学参考。[方法] 以砒砂岩区 2000—2021 年四期遥感影像为基础, 基于 GIS 技术和 ESV 评估方法, 分析了 20 年来 LUCC 与 ESV 的变化特征, 探究 LUCC 引起的 ESV 的响应关系, 并利用马尔科夫模型对两者的发展趋势进行了预测。[结果] (1) 2000—2020 年, LUCC 总面积保持不变, 建设用地增幅最明显, 共增加 762.73 km², 增长率达 4.57%; 草地减幅最明显, 共降低 548.79 km², 减少率达 3.28%。(2) ESV 整体水平呈下降趋势, 从 199.496 5 亿元下降到 189.971 9 亿元, 下降 4.78%, 其中, 草地 ESV 变化最大, 减少 7.462 9 亿元, 占总体下降率的 78.35%。(3) ESV 与草地、林地、耕地、水域及建设用地面积变化呈正相关, 与未利用地呈负相关。(4) 经预测, 未来 10 年耕地、林地、草地、水域面积会下降至 2020 年的 96.69%, 98.94%, 94.27%, 99.12%; 建设用地、未利用地会增加至 150.03%, 121.61%, 砒砂岩地区整体 ESV 水平会继续减少至 92.81%。[结论] 耕地、林地、草地和水域的面积在减少, 建设用地及未利用地的面积会增加, ESV 会持续减少, ESV 变化与土地利用变化之间呈线性关系, 未来建设用地的面积会增加, ESV 会继续减少, 合理调节建设用地的面积有利于黄河砒砂岩区生态建设和植被恢复重建。

关键词: 砒砂岩; 土地利用/覆被变化; 生态系统服务价值; 黄河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0337-07

Response to the Value of Land Use Ecosystem Services in the Sandstone Area of the Yellow River

Cao Changjing¹, Zhang Lu, Liang Tong¹, Zhang Pan², Han Jiaqi¹, Yang Wenjie¹

(1. North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450046, China; 2. Yellow River Water Conservancy Research Institute, Yellow River Water Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the response of ecosystem service value to land use change and predicting future trends, and to provide scientific reference for land use pattern planning in the arsenic sandstone area. [Methods] Based on the remote sensing images of the four phases of sandstone area from 2000 to 2020, the change characteristics of LUCC and ESV in the past 20 years were analyzed based on GIS technology and ESV evaluation methods. The response of LUCC induced by ESV was revealed. The development trend of LUCC and ESV was predicted by using Markov model. [Results] (1) In 2000—2020, the total area of LUCC remained unchanged, and the increase of construction land was the most obvious, with a total increase of 762.73 km² and a growth rate of 4.57%. The grassland decreased by 548.79 km² in total, with a reduction rate of 3.28%. (2) The overall level of ESV showed a downward trend, from 19 949.65 million yuan to 18 997.19 million yuan, a decrease of 4.78%, of which grassland ESV changed the most, decreasing by 746.29 million yuan, accounting for 78.35% of the overall decline rate. (3) ESV was

收稿日期: 2023-11-30

修回日期: 2023-12-09

资助项目: 国家自然科学基金“砒砂岩区坡沟系统微地形—土壤—植被空间耦合机理研究”(32101591); 国家重点研发计划课题“风水复合侵蚀协同阻控机制”(2022YFF1300805)

第一作者: 曹倡景(1996—), 男, 河南信阳人, 在读硕士研究生, 研究方向: 水土保持与生态治理。E-mail: caochangj07100@163.com

通信作者: 张璐(1982—), 女, 河南郑州人, 副教授, 研究方向: 水土保持、生态遥感。E-mail: zhanglu@ncwu.edu.cn

http://stbcyj.paperonice.org

positively correlated with the changes in grassland, woodland, cultivated land, water area and construction land, and negatively correlated with unused land. (4) It is predicted that the area of cultivated land, forest land, grassland and water area will decrease to 96.69%, 98.94%, 94.27% and 99.12% of those in 2020 in the next 10 years. Construction land and unused land will increase to 150.03% and 121.61%, and the overall ESV level in sandstone area will continue to decrease to 92.81%. [Conclusion] The areas of cultivated land, forest land, grassland, and water are decreasing, while the area of construction land and unused land will increase. ESV will continue to decrease, and there is a linear relationship between ESV changes and land use changes. In the future, the area of construction land will increase, and ESV will continue to decrease. Reasonably adjusting the area of construction land is beneficial for ecological construction and vegetation restoration and reconstruction in the sandstone area of the Yellow River Basin.

Keywords: Soft sandstone; land use/cover change; value of ecosystem services

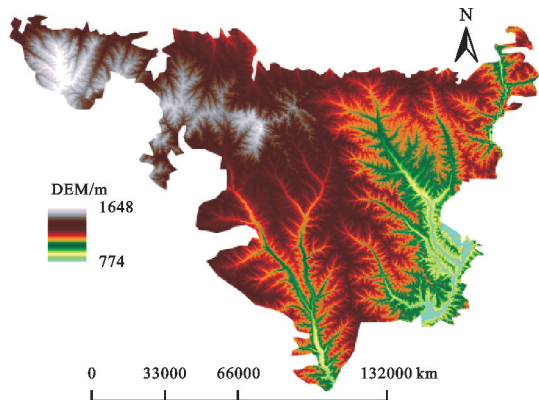
土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)是人类活动对环境的影响最直接的体现^[1],直接影响生态系统的结构、过程、功能,导致生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)变化^[2]。从 LUCC 过程等方面来揭示生态系统服务价值的响应,从而到达优化土地利用结构、提高生态系统服务价值能力,实现可持续发展的战略目标^[3]。生态服务包括生产食物与原材料、调节气体与气候、涵养水源、形成与保护土壤、处理废物、维持生物多样性以及休闲娱乐等方面^[4]。随着人类活动所需生态系统服务数量和种类越来越多,土地利用结构随之调整,生态系统服务功能呈现出时空变异特征^[5]。我国学者谢高地等研究提出中国生态系统服务价值的基础当量^[6],采用基于单位面积农田生态系统粮食生产的净利润参数,来量化生态系统服务价值^[7],基本可以反映出人们从生态系统中获得的利益。诸多学者也在不同时空尺度上^[8-10],订正生态系统服务当量后,结合敏感度分析土地利用结构与生态系统服务之间的关系,就 LUCC 对 ESV 的影响进行了相关的研究。分析了土地利用结构与生态系统服务之间的变化特征^[11],探究两者之间的响应关系^[12]。研究表明,基于 LUCC 来揭 ESV 估算是最直接的方法^[13],能直接反映区域生态系统由人类活动产生的影响,是土地可持续利用以及生态环境评估的有效方法^[14]。

近年来,随着黄河砒砂岩区城市建设发展,LUCC 剧烈,特别是建设用地波动较大,人地矛盾日益突出。探明该地区的 LUCC 与 ESV 响应机制,对于该地区生态建设和高质量发展具有重要意义^[15]。本文以黄河砒砂岩区为研究区,基于 LUCC 和 ESV 评估等相关理论与方法^[16],对 20 a 来 LUCC 及 ESV 动态响应进行研究,为砒砂岩区生态综合治理提供科学参考,有助于区域 LUCC 优化调控,增强区域生态系统服务功能,改善生态环境,保障耕地资源和生态空间^[17],加强对黄河

流域泥沙主要来源区整体系统治理的理论研究,为实现黄河流域生态保护提供科技参考^[18]。

1 研究区概况

砒砂岩成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低,遇水极易被侵蚀^[19]。本研究以砒砂岩区为研究区,主要分布的鄂尔多斯高原,按覆土程度可大致分为三大类型区,即裸露砒砂岩区、盖土区、盖沙区,总面积 1.67 万 km²。该地区天然植被覆盖率还不到 2%,是黄河流域中极度脆弱、土壤侵蚀最为剧烈的区域,是黄河粗泥沙主要来源区^[20],研究区位置见图 1。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区位置

Fig. 1 Location map of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

(1) 土地利用数据。选用内蒙古砒砂岩地区 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 5 期遥感影像作为数据源,其中 2000—2010 年遥感图像使用 Landsat-TM 遥感图像为信息源,2015—2020 年遥感图像使用 Landsat-8 遥感数据为主要信息源,分辨率为 30 m,选择 6 月中旬至 9 月下旬的图像,云

量均 10% 以下,影像质量良好。

(2) 土地利用分类及处理。通过 ArcGIS 软件遥感影像进行校正,将土地利用类型一级分类划分为草、耕、林、水域、建设用(同城乡、居民、其他建设用

地)、及未利用地 6 类,ArcGIS 10.2 软件支持下制作出内蒙古砒砂岩地区的 5 个时期的土地利用变化对比图(图 2),基于 LUCC 遥感图像分类解译,获取土地利用现状面积数据进行计算。

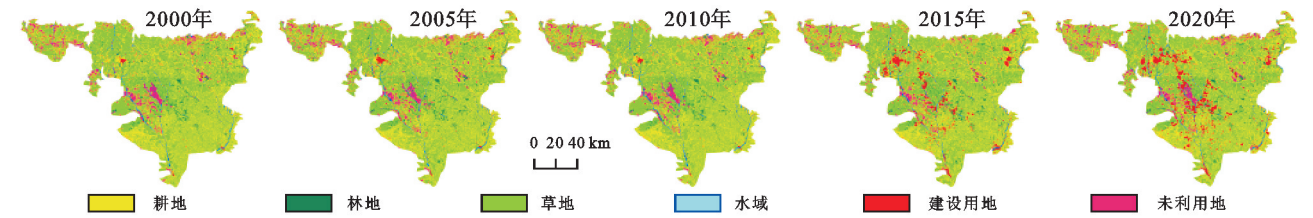


图 2 砒砂岩区 2000—2020 年土地利用

Fig. 2 Land Use Map of Soft Sandstone Area from 2000 to 2020 years

2.2 土地利用动态变化

(1) 土地利用动态度。为了清楚地分析研究区的 LUCC 过程及剧烈程度,提取土地利用转移矩阵分析,借助土地利用动态度来进行计算^[21],可以计算出研究地区不同时期和不同土地利用类型数量变化的速率^[22]。土地利用动态度公式如下:

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a\times T}\times100\% \tag{1}$$

式中: K 为区域内某一土地利用类型的动态度; U_a 和 U_b 分别表示土地利用类型研究开始时和研究结束时期的数量, T 为研究周期。为了直观地体现出 20 年间 6 类土地利用的总体变化情况,添加了转入动态度和转出动态度,删除了研究周期 T 的影响。

2.3 生态系统服务价值响应

本研究基于货币的价值量评价法,结合砒砂岩地区的实际情况,将单位生态系统服务价值当量因子定为内蒙古砒砂岩地区每年每公顷农作物产量总值的 1/7,得到砒砂岩地区单位面积 ESV 当量^[23];计算每种土地利用类型的单位面积 ESV,确定内蒙古的耕地当量因子为全国耕地的 0.44 倍^[24],制定砒砂岩区生态系统单位面积 ESV 当量表(表 2)与不同土地类型 ESV 表(表 3)。公式如下:

$$D_n=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^n\frac{f_iu_iy_i}{H} \tag{2}$$

式中: D_n 为耕地在单位面积上产生的价值(元/ hm^2); i 为作物类型; y_i 为该种作物的价格(元/kg); u_i 为该种作物的产量(kg/ hm^2); f_i 为该种作物的面积(hm^2); H 为各种作物总面积(hm^2),不考虑价格波动因素,统一选取 2020 年秋收平均价格,及 2020 年作物的种植面积及产量。

将中国单位生态系统服务当量的经济价值乘以修正系数后得到砒砂岩区生态系统服务价值当量,进而计算生态系统服务价值,做出砒砂岩区生态系统服务价值及变化率表,其公式为:

$$ESV=\sum(AK\times VCK)$$

$$ESV_f=\sum(AK\times VC_{fK}) \tag{3}$$

式中:ESV 为生态系统服务价值;AK 是土地利用类型 K 的面积; VCK 是单位面积土地利用类型 K 的生态系统价值; ESV_f 是生态系统第 f 项服务功能价值; VC_{fK} 是土地利用类型 K 的第 f 项服务功能价值系数。

2.4 生态系统服务价值预测

基于 2000—2020 年砒砂岩区土地利用类型的 ESV 动态变化数据,借助马尔可夫链(Markov Chain)预测研究区 2030 年 ESV 的变化情况,为研究区未来土地利用结构调整提供数据支撑。马尔可夫分析法的基本模型为:

$$X(K+1)=X(K)P \tag{4}$$

式中: $X(K)$ 表示趋势分析与预测对象在 K 时刻的状态向量; P 表示一步转移概率矩阵; $X(K+1)$ 表示趋势分析与预测对象在 $K+1$ 时刻的状态向量。

3 结果与分析

3.1 土地利用

3.1.1 土地利用动态度 砒砂岩地区 2000—2020 年不同土地利用类型变化情况表(表 1)显示,近 20 年耕地、草地面积明显减少,林地与建设用地面积大幅增加。其中耕地面积减少约为 317.72 km^2 ,草地面积减少 548.79 km^2 ,水域面积少 36.9 km^2 ,林地面积增加 137.97 km^2 ,建设用地增加 762.73 km^2 ,未利用地总增加 1.64 km^2 在总体水平上保持稳定。

从土地动态度及土地利用变化(表 1)来看,建设用地与林地变化幅度较大;耕地持续减少,最大变化值达到 0.68%;退耕还林还草政策的实施使得林地先增加后减少,最大值为 4.94%;草地面积呈减少的趋势,最大变化值 0.74%;水域面积的减少是人类生产生活用水的需求增加导致,最大变化值 1.03%;建设用地明显呈增长趋势,最大值为 18.46%;未利用地先增加再减少的后增加,最大变化值 5.69%,曲折的变化情况,反映出该地区水土流失的治理困难。

表 1 砭砂岩 2000—2020 年不同土地利用类型变化情况

Table 1 Changes in Different Land Use Types of Soft Sandstone from 2000 to 2020

类型	2000 年 面积/km ²	动态度/%	2005 年 面积/km ²	动态度/%	2010 年 面积/km ²	动态度/%	2015 年 面积/km ²	动态度/%	2020 年 面积/km ²
耕地	3535.28	−0.68	3415.91	−0.54	3323.92	−0.25	3283.05	−0.4	3217.56
林地	663.46	4.94	812.25	−0.06	809.96	−0.09	806.17	−0.12	801.43
草地	10791.42	−0.16	10706.38	0.23	10829.23	−0.36	10635.9	−0.74	10242.63
水域	514.16	−1.03	487.68	−0.26	481.44	−0.18	477.05	0.01	477.25
建设用地	221.17	3.12	255.7	18.46	491.69	10.08	739.48	6.61	983.9
未利用地	980.75	0.97	1028.37	−5.02	770.1	−0.14	764.66	5.69	982.39
合计	16706	7.16	16706	12.81	16706	9.06	16706	11.05	16706

3.1.2 土地利用转移 利用 GIS 进行了土地利用转移矩阵分析,通过土地利用转移桑基图(图 3),可知研究期内具体变化情况如下:耕地面积持续减少,其中 456.02 km² 转化成草地;草地的增加主要来源于耕地及未利用的转入,在 2010—2020 年,草地向建设用地转入 304.12 km² 是减少的主要因素;截至 2020 年林地转入面积 239.06 km² 主要来源于耕地与草地的转入;水域面积持续向耕地与草地转入导致面积不断减少;2000—2005 年草地向未利用地的转入,使未利用地达到最大值,随后未利用地开始向草地与建设用地转化;建设用地总转入面积 778.16 km²,主要来源于草地、未利用地的转入。

3.2 生态系统服务价值

3.2.1 生态系统服务价值当量 砭砂岩地区多分布于鄂尔多斯市,依据谢高地^[7] 提出的《中国陆地生态系统服务价值当量因子表》,设置鄂尔多斯市当量因子,建筑用地当量因子参考李晓赛^[25] 研究成果进行设定。不考虑价格波动的情况下,该地区主要种植作物玉米的种植面积 27.74 万 hm²,平均收购价格 2.104 2 元/kg、产量为 6 517 kg/hm²;小麦的种植面

积 0.64 万 hm²,平均收购价格 2.523 6 元/kg、总产量为 5 814 kg/hm²;大豆的种植面积 0.85 万 hm²,平均收购价格 5.00 元/kg、总产量为 1 675 kg/hm²,根据公式 2 计算出内蒙古砭砂岩地区的一个生态系统服务价值当量因子为 1 968 元/hm² 做出单位公顷不同类型土地生态系统服务价值表(表 2)及不同时期各类土地 ESV 价值表(表 3)。

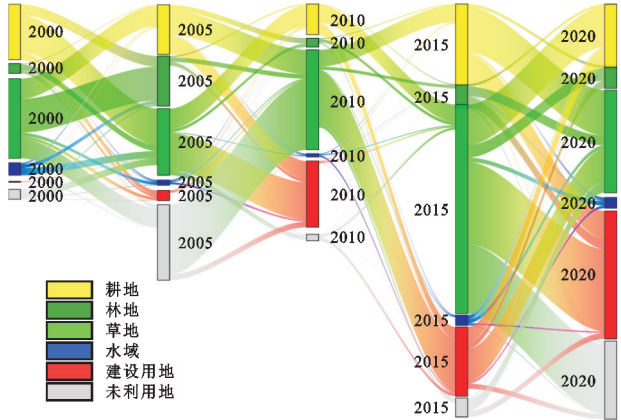


图 3 2000—2020 年砭砂岩区土地利用转移变化

Fig. 3 Land use transfer change map of arsenic sandstone area from 2000 to 2020 years

表 2 单位面积土地生态系统服务价值

Table 2 Value of unit area land ecosystem services

土地利用 类型	林地		草地		耕地		水域		未利用地		建设用地	
	系数	价值/元	系数	价值/元	系数	价值/元	系数	价值/元	系数	价值/元	系数	价值/元
气体调节	3.5	6888	0.8	1574.4	0.5	984	0	0	0	0	0	0
气候调节	2.7	5313.7	0.9	1771.2	0.89	1751.52	0.46	905.28	0	0	0	0
水源涵养	3.2	6297.6	0.8	1574.4	0.6	1180.8	20.28	39911.04	0.03	59.04	−7.51	−14779.68
土壤形成与保护	3.9	7675.2	1.95	3837.6	1.46	2873.28	0.01	19.68	0.02	39.36	0.02	39.36
废物处理	1.31	2578.08	1.31	2578.08	1.64	3227.52	18.18	35778.24	0.01	19.68	−2.46	−4841.28
生物多样性维持	3.26	6415.68	1.09	2145.12	0.71	1397.28	2.49	4900.32	0.34	669.12	0.34	669.12
食物生产	0.1	196.8	0.3	590.4	1	1968	0.1	196.8	0.01	19.68	0.01	19.68
原材料供给	2.6	5116.8	0.05	98.4	0.1	196.8	0.01	19.68	0	0	0	0
游憩文化	1.28	2519.04	0.04	78.72	0.01	19.68	4.34	8541.12	0.01	19.68	0.01	19.68
合计		43000.9		14248.32		13598.88		90272.16		826.56		−18873.12

3.2.2 生态系统服务价值变化 通过 20 年间不同类型土地 ESV 的变化可知,2000—2010 年 ESV 先减少后

增加,2010—2020 年 ESV 不断减少;在 2010 年砭砂岩区的 ESV 达到最大值 203.625 3 亿元,其中草地的 ESV

到达最大值 147.594 8 亿元;2020 年砒砂岩区的 ESV 为最小值 189.971 9 亿元,其中草地的 ESV 为 139.288 3 亿元。草地的 ESV 变化与整体变化趋势相似;耕地和水域的 ESV 不断减少;林地的 ESV 先增加后减少;未利用地的 ESV 变化曲折,整体水平上趋于稳定;建设用地的 ESV 呈持续增长趋势;整体水平上有所减少,主要是人们对建设用地面积的需求在不断增加以及草地面积的减少导致(表 3)。

表 3 砒砂岩区不同土地类型的生态系统服务价值
Table 3 Ecosystem service value of different land types in the arsenic sandstone area

项目	ESV/亿元					比例/%				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	15.2048	14.6915	14.2958	14.1201	13.8384	7.62	7.47	7.02	7.07	7.28
林地	9.4532	11.5731	11.5406	11.4866	11.4903	4.74	5.88	5.67	5.75	6.05
草地	146.7512	145.5948	147.2654	144.6363	139.2883	73.56	74.02	72.32	72.46	73.32
水域	46.4143	44.0239	43.4606	43.0643	43.0823	23.27	22.38	21.34	21.57	22.68
建设用地	0.1828	0.2114	0.4064	0.6112	0.8133	0.09	0.11	0.2	0.31	0.43
未利用地	-18.5098	-19.4086	-13.3435	-14.3152	-18.5407	-9.28	-9.87	-6.55	-7.17	-9.76
合计	199.4965	196.6861	203.6253	199.6033	189.9719	100	100	100	100	100

3.3 预测

根据近 20 年间砒砂岩区土地利用变化情况及相应的生态系统服务价值变化情况,结合马尔科夫模型可以预测,在无其他人为因素的干扰下未来 10 a 的变化(图 4),耕地、林地、草地、水域面积会下降至 2020 年的 96.69%,98.94%,94.27%,99.12%;建设用地、未利用地会增加至 150.03%,121.61%,砒砂岩地区整体 ESV 水平会继续减少至 92.81%。导致这种情况发生的因素有农牧业养殖规模的增加以及水土流失泥沙冲刷引起的草地和水域面积的减少,未利用地的增加,人们对建设用地的需求不断增加,最终导致整体水平上 ESV 呈不断减少的趋势。

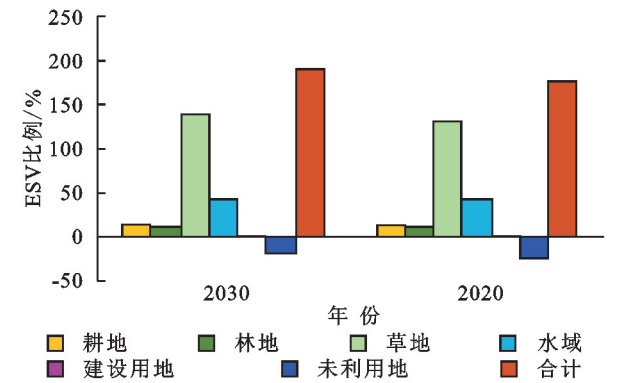


图 4 砒砂岩区土地利用 ESV 预测
Fig. 4 Land use ESV forecast map for arsenic sandstone area

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究仅对静态时点的讨论,选取指标进行地区调整,借助粮食产量法对耕地单位面积每年自然粮食产量的生产服务功能的经济价值进行调整,进而确定适合本区域的当量因子表,选取设计修正系数对地域差异性进行了调整,然而生态系统服务价值是随着自然和经济条

件的变化而不断变化的,本研究未考虑到气候、地貌、土壤、作物生产力以及市场支付、市场交易等经济条件对生态系统服务价值综合影响。

4.2 结论

砒砂岩地区 20 年间土地利用及生态系统服务价值之间存在线性相关的变化响应。(1) 2000—2020 年,建设用地共增加 762.73 km²;草地共减少 548.79 km²。(2) ESV 整体下降 4.78%,从 199.496 5 亿元下降到 189.971 9 亿元,草地共减少 7.462 9 亿元。(3) ESV 与草地、林地、耕地、水域及建设用地面积变化呈正相关,与未利用地呈负相关。(4) 经预测,未来 10 a 地区整体 ESV 水平会继续减少至 92.81%,草地面积的减少 5.73%及建设用地面积的增加 50.03%及未利用地的增加 21.61%会导致砒砂岩地区水土流失情况的加剧,是生态系统服务价值下降的主要因素。优化调整该地区土地利用结构,增加草地、林地的面积,有利于增强该地区生态系统服务能力,减缓水土流失状况,降低黄河流域粗泥沙的输入量,有利于黄河流域生态保护和高质量发展的战略推动。

参考文献 (References):

[1] 肖建设,乔斌,陈国茜,等.黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J].生态学报,2020,40(2): 510-521.
Xiao J S, Qiao B, Chen G Q, et al. Land use change and evolution of ecosystem service value in Maduo County of source region of the Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):510-521.
[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[J].生态学报,1999,19(5): 607-613.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecologi-

- cal-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5):607-613.
- [3] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].*资源科学*, 2015, 37(9):1740-1746.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9):1740-1746.
- [4] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].*生态学报*, 2023, 43(11):4473-4487.
- Ren Y M, Liu X P, Xu X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the FLUS-InVEST Model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11):4473-4487.
- [5] 张思颖,陈蓉蓉,程先.重庆龙溪河流域水生态系统服务时空演变及对土地利用变化响应[J].*水土保持学报*, 2023, 37(4):173-183.
- Zhang S Y, Chen R R, Cheng X. Spatiotemporal changes of water-related ecosystem services and the responses to land use changes of the Longxi River Basin, Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4):173-183.
- [6] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.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.
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5):911-919.
- [7] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.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.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [8] 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.
- Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2):189-196.
- [9] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.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.
- Xu L F, Xu X G, Luo T, et al. Services based on land use: A case study of Bohai Rim [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10):1775-1784.
- [10] 雷金睿,陈宗铸,陈小花,等.1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J].*生态学报*, 2020, 40(14):4760-4773.
- Lei J R, Chen Z Z, Chen X H, et al. Spatio-temporal changes of land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14):4760-4773.
- [11] 程琳,李锋,邓华锋.中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变[J].*生态学报*, 2011, 31(20):6194-6203.
- Cheng L, Li F, Deng H F. Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20):6194-6203.
- [12] 刘桂林,张落成,张倩.长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J].*生态学报*, 2014, 34(12):3311-3319.
- Liu G L, Zhang L C, Zhang Q. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3311-3319.
- [13] 孙慧兰,李卫红,陈亚鹏,等.新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应[J].*生态学报*, 2010, 30(4):887-894.
- Sun H L, Li W H, Chen Y P, et al. Response of ecological services value to land use change in the Ili River Basin, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):887-894.
- [14] 刘金巍,靳甜甜,刘国华,等.黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能[J].*生态学报*, 2014, 34(23):7013-7025.
- Liu J W, Jin T T, Liu G H, et al. Changes in land use and soil and water conservation of the upper and middle reaches of Heihe River Basin during 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23):7013-7025.
- [15] 欧维新,王宏宁,陶宇.基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化[J].*生态学报*, 2018, 38(17):6337-6347.
- Ou W X, Wang H N, Tao Y. A land cover-based assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17):6337-6347.
- [16] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].*生态学报*, 2016, 36(17):5401-5410.
- Xu X L, Li X, Xiao C J, et al. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17):5401-5410.
- [17] 戚丽萍,栾兆擎,魏勉,等.基于土地利用的江苏省各市生态系统服务价值时空变化研究[J].*南京林业大学学报:自然科学版*, 2023, 47(4):200-208.
- Qi L P, Luan Z Q, Wei M, et al. Spatial and temporal variations of ecosystem service values in Jiangsu Prov-

- ince based on land-use change[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2023, 47(4): 200-208.
- [18] 姚文艺, 焦鹏. 黄河流域水土保持综合治理空间均衡性分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 1-7, 22.
Yao W Y, Jiao P. Spatial equilibrium analysis of comprehensive control of soil and water conservation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 1-7, 22.
- [19] 张攀, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 109-116.
Zhang P, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Interactive superposition effect of multi-dynamic erosion in the Pisha sandstone area of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(1): 109-116.
- [20] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 1-7, 65.
Yao W Y, Li C M, Zhang P, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of pisha sandstone [J]. *Yellow River*, 2018, 40(6): 1-7, 65.
- [21] 王宗明, 张树清, 张柏. 土地利用变化对三江平原生态系统服务价值的影响[J]. *中国环境科学*, 2004(1): 126-129.
Wang Z M, Zhang S Q, Zhang B. Effects of land use change on values of ecosystem services of Sanjiang Plain, China [J]. *China Environmental Science*, 2004(1): 126-129.
- [22] 张天海, 田野, 徐舒, 等. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
Zhang T H, Tian Y, Xu S, et al. The evolvement of land use patterns in coastal cities and its influence on ecosystem service values [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [23] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1280-1290.
Zhang J, Lei G, Qi L H, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- [24] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
Xie G D, Xiao Y, Zhen L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.
- [25] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 373-381.
Li X S, Zhu Y M, Zhao L, et al. Ecosystem services value change in Qinglong County from dynamically adjusted value coefficients [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3): 373-381.
- ~~~~~
- (上接第 336 页)
- [26] 许洁, 陈惠玲, 商沙沙, 等. 2000—2014 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 592-601.
Xu J, Chen H L, Shang S S, et al. Response of net primary productivity of Tibetan Plateau vegetation to climate change based on CEVSA model [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 592-601.
- [27] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1533-1538.
Liu J, Ji Y H, Zhou G S, et al. Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [28] 徐兴奎, 陈红, Levy Jason K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J]. *科学通*
报, 2008, 53(4): 456-462.
Xu X K, Chen H, LEVY Jason K. Temporal and spatial changes of vegetation coverage characteristics in Qinghai-Tibet Plateau under the background of climate warming and its causes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(4): 456-462.
- [29] 王莉娜, 宋伟宏, 张金龙, 等. 祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析[J]. *草业科学*, 2020, 37(8): 1458-1474.
Wang L N, Song W H, Zhang J L, et al. Spatio-temporal evolution of vegetation net primary productivity in Qilian Mountain National Park and its driving factors [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1458-1474.
- [30] 朱华. 青海湖流域生态治理模式与对策研究[J]. *青海社会科学*, 2012(6): 94-98.
Zhu H. Study on ecological management model and countermeasures in Qinghai Lake Basin [J]. *Qinghai Social Sciences*, 2012(6): 94-98.