

DOI: 10.5846/stxb202008262212

张发, 玉素甫江·如素力, 艾尔肯·图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2021, 41(13): 5254-5265.

Zhang F, Yusufujiang Rusuli, Aierken Tuersun. Spatio-temporal change of ecosystem service value in Bosten Lake Watershed based on land use. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5254-5265.

基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化

张 发^{1,2}, 玉素甫江·如素力^{1,2,*}, 艾尔肯·图尔逊^{1,2}

1 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

2 新疆干旱区环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054

摘要:探讨土地利用变化及其对生态服务功能价值影响,是促进流域生态环境保护和资源合理配置的重要理论依据和决策支持。采用改进的生态系统服务价值评估、热点分析等方法探究了博斯腾湖流域 1995—2018 年土地利用变化与生态系统服务价值时空(ESV)演变。结果表明:(1)流域旱地、建设用地面积持续增加;荒漠、草甸、湿地、水域、灌木面积呈现波动增长趋势;裸地、草原、冰川积雪、阔叶、针叶面积呈现波动下降趋势。(2)流域 23 年间 ESV 呈减小—增大—减小—增大的波动增大趋势,调节服务和支持服务构成流域 ESV 主体。水域、草甸和草原是流域 ESV 变化主要的贡献因子和敏感因子,其中水域和草甸为正向贡献因子;草原为负向贡献因子。(3)流域 ESV 总体空间分布呈“北偏高,南偏低”,唯一高值集聚区(博斯腾湖)点缀在低值区的格局,ESV 南北空间差异明显;研究区年平均湿地和水域面积之和仅占总面积的 3.61%,主导着整个流域生态系统服务价值的变化,是流域环境保护和生态建设的重心。(4)流域生态系统服务价值热点区域变化不大,冷点区域面积大且呈缩减趋势。流域北部的 ESV 空间演变较为显著,其原因是荒漠和裸地、草原和草甸等自然生态系统转换频繁。研究区南部的绿洲区的扩张使得局部冷点区转为次冷点区。

关键词:土地利用变化;生态系统服务价值;热点分析;博斯腾湖流域

Spatio-temporal change of ecosystem service value in Bosten Lake Watershed based on land use

ZHANG Fa^{1,2}, Yusufujiang Rusuli^{1,2,*}, Aierken Tuersun^{1,2}

1 Institute of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

Abstract: Assessments of the effect of land-use change and the ecosystem service value (ESV) provide critically important information that has implications for ecological protection and the rational allocation of resources in terrestrial ecosystems, especially for fragile and threatened ecosystems in arid lands. Here, we used the modified ESV evaluation and hotspot analysis methods to analyze land use cover change and ESV from 1995 to 2018 in the Bosten Lake watershed. We found that (1) the area of dry land and construction land increased continuously; the area of desert, meadow, wetland, water area, and shrubland exhibited a fluctuating increasing pattern; and the area of bare land, grassland, glacier snow, broadleaf forest, and coniferous forest showed a fluctuating decreasing pattern. (2) The ESV first decreased, then increased, decreased again, and then increased. The ESV indicates that regulation and supporting services were the main services provided. Water area, meadow, and grassland were the main factors contributing to ESV change; water area and meadow

基金项目:国家自然科学基金 NSFC-新疆联合基金项目(U1703341)

收稿日期:2020-08-26; **修订日期:**2021-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

contributed positively, whereas grassland contributed negatively. (3) ESV was higher in the northwest than in the southeast. The only high-value agglomeration area (Bosten Lake) was distributed in the area of low ESV. The ESV significantly varied along the north - south gradient in the watershed. The annual average area of wetland and water area, which occupied 3.61% of the entire study area, is the focus of environmental protection and ecological construction in the Bosten Lake watershed. (4) The ESV hotspot area varied little during the study period, and the ESV cold spot area was larger than the hotspot area and decreased throughout the study period. Conversions between desert, grassland, meadow, and bare land systems were frequent, which led to significant variation in the ESV in the northern part of the study area. The increase in the size of the oasis resulted in a change in the cold spot area in the southern part of the study area.

Key Words: land use cover change; ecosystem service value; hot spot analysis; Bosten Lake Watershed

生态系统服务是指人类通过生态系统结构、过程和功能得到的生命支持产品和服务^[1],以满足生存、健康、福祉等多种需求^[2]。土地利用/覆盖变化(Land use and land cover change,LUCC)是人类活动作用于生态系统的重要方式^[3],它通过改变生态系统格局与过程,驱动着生态系统产品与服务提供能力的变化^[4-5]。土地利用变化及其对生态系统服务价值(Ecosystem Services Value,ESV)的影响研究日益增多,成为土地利用变化的热点之一^[6],并取得了较为丰硕的成果^[7-12]。

自生态系统服务功能提出以来,在生态系统服务功能概念及其分类、价值量化评估方法和应用等方面取得了较大的进展^[13]。1997年 Costanza^[14]等构建了“全球生态系统服务价值当量表”及“全球生态服务价值分析模型”奠定了生态系统服务价值研究的理论基础。同年 Daily^[15]发表的专著详尽论述了生态系统服务功能的概念、研究简史、价值评估等。我国学者从20世纪末越来越重视生态系统服务价值的研究,2003年谢高地^[16-17]等根据 Costanza 的方法构建了符合中国国情的当量因子表并确立了中国单位面积价值当量及计算,国内众多学者据此当量表开展研究,刘玉卿^[18]、杨延成^[19]等从景观格局演变分析对 ESV 的影响;王壮壮^[20]、李涛^[21]、黄木易^[22]等探讨了 LUCC 对 ESV 时空分布格局的影响和 ESV 尺度响应特征;程静^[23]、耿甜伟^[24]等运用主成分分析和地理回归加权模型探讨了 ESV 演变驱动力和 ESV 主导因子空间异质特征;王云^[25]、黄傅强^[26]等将生态系统服务价值应用于生态安全格局优化和城市增长边界划定的研究。2015年,谢高地^[27]等对当量因子表进行修订和细分,为更加准确地评估我国生态系统服务功能的价值提供了重要基础。本文基于优化的中国陆地生态系统服务价值当量因子开展土地利用变化对博斯腾湖流域生态系统服务价值的影响研究。

博斯腾湖流域深居西北内陆,是典型的干旱区山地-绿洲-荒漠陆面格局,同时也是塔里木河下游“生态输水”的重要水源保护地,承载着重要的生态功能。加强对博斯腾湖流域生态系统服务价值的研究对流域内社会经济可持续发展乃至塔里木河的生态系统健康发展具有重要理论意义和现实价值。因此,本文以土地利用数据为基础,定量研究博斯腾湖流域土地利用变化与生态系统服务价值时空演变规律,为流域土地利用和生态建设提供参考。

1 研究区概况

博斯腾湖流域位于新疆巴音郭楞蒙古自治州境内,区域内地势总体呈西北高、东南低,北依天山中段南侧为霍拉山-库鲁克塔格低矮山。地理位置为东经 82°28′—88°20′E,北纬 41°0′—43°32′N,总面积约 79204.25 km²,海拔高度介于 860—4739 m 之间。行政区划包括和硕县、和静县、焉耆县、博湖县、轮台县(部分)、库尔勒市、铁门关市(原新疆生产建设兵团第二师)以及尉犁县的部分区域(图 1)。博斯腾湖流域属于温带大陆性干旱气候,日照时间长,年平均降水量仅约 60 mm,且 80%以上集中在夏季,平均蒸发量 2368 mm。流域内河流补给主要依靠高山冰雪融水及降雨。博斯腾湖流域景观的分布随海拔高度的变化,自高到低主要有冰川积雪带、草甸草原带、绿洲平原、荒漠草原带和荒漠带等^[28]。

流域,因此本文根据该流域的情况对当量表进行适当修订。根据区域修正系数表^[33]获得新疆农田生态系统的生物量因子为 0.58,又由于博斯腾湖流域平均粮食产量是新疆平均粮食产量的 1.01 倍,因此博斯腾湖流域农田生态系统服务价值系数是全国水平的 0.60 倍。1995—2018 年博斯腾湖流域平均粮食产量为 6312.79 kg/hm²,2018 年新疆平均粮食价格为 1.98 元/kg,计算出博斯腾湖流域生态系统服务价值量为 1064.05 元/hm²。将此与各生态服务价值当量值相乘,最终得出博斯腾湖流域生态系统单位面积服务价值系数表(表 1),并通过公式 2 和公式 3 计算研究区生态系统服务价值。

$$ESV = \sum_{i=1}^n (A_k \times VC_k) \tag{2}$$

$$ESV_f = \sum_{i=1}^n (A_k \times VC_{jk}) \tag{3}$$

式中,ESV 和 ESV_f 分别是生态系统服务总价值和第 f 项服务功能价值; A_k 代表土地利用类型 k 的面积(hm²); VC_k 和 VC_{jk} 分别是土地利用类型 k 的生态系统服务价值系数和第 f 项服务功能价值系数。

表 1 博斯腾湖流域生态系统服务价值系数表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Coefficient table of the Ecosystem Services Value in Bosten Lake Watershed

一级类型 First category	供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services				支持服务 Supporting services			文化服务 Cultural services
二级分类 Second category	食物 生产	原料 生产	水资源 供给	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	土壤 保持	维持养 分循环	生物 多样性	美学 景观
旱地 Dry land	904.44	425.62	21.3	712.91	383.06	106.40	287.29	1095.97	127.69	138.33	63.84
水田 Paddy field	1447.11	95.76	-2798.45	1181.10	606.51	180.89	2894.22	10.64	202.17	223.45	95.76
针叶 Coniferous forest	234.09	553.31	287.29	1808.88	5394.73	1585.43	3553.9	2191.93	170.25	2000.41	872.51
阔叶 Broadleaf forest	308.57	702.27	361.78	2308.99	6916.32	2053.62	5043.60	2819.73	212.81	2564.36	1127.89
灌木 Shrubland	202.17	457.54	234.09	1500.31	4500.93	1361.98	3564.57	1830.17	138.33	1670.56	734.19
草原 Grassland	106.40	148.97	85.12	542.67	1425.83	468.18	1042.77	659.71	53.20	595.87	266.01
草甸 Meadow	234.09	351.14	191.53	1213.02	3213.43	1064.05	2351.55	1479.03	117.05	1351.34	595.87
湿地 Wetland	542.67	532.02	2755.89	2021.69	3830.58	3830.58	25781.93	2457.96	191.53	8374.07	5032.96
荒漠 Desert	10.64	31.92	21.28	117.05	106.40	329.86	223.45	138.33	10.64	127.69	53.20
裸地 Bare land	0.00	0.00	0.00	21.28	0.00	106.40	31.92	21.28	0.00	21.28	10.64
水域 Water area	851.24	244.73	8820.97	819.32	2436.67	5905.48	108788.46	989.57	74.48	2713.3	2011.05
冰川积雪 Glacier snow	0.00	0.00	2298.35	191.53	574.6	170.25	7586.68	0.00	0.00	10.64	95.76

3.3 生态系统服务价值变化特征分析

(1)生态贡献率表示某一时间段内不同土地利用变化产生的生态服务价值变化量对区域总服务价值变化量的影响大小和影响方向,可用来揭示影响区域生态服务价值变化的主要贡献因子和敏感因子^[34]。

$$S_{KT} = \frac{\Delta ESV_{KT}}{\sum_{k=1}^5 |\Delta ESV_{KT}|} \times 100\% \tag{4}$$

式中, S_{KT} 为 K 类生态系统在时间段 T 的生态服务贡献率; ΔESV_{KT} 为 K 类生态系统在时间段 T 内的生态服务价值变化量。

(2)热点分析 G_i^* 指数可以反映生态系统服务价值的冷热点分布格局,以及确定高值区和低值区在空间上发生聚类的位置,能有效揭示生态系统服务提供能力的空间差异^[35]。公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\left[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right] / (n-1)}} \tag{5}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{X})^2} \quad (7)$$

式中, n 为研究区网格数量; x_i 分别为网格 i 和 j 的生态系统服务价值; $\bar{X}$ 为平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。

3.4 敏感性分析

本文采用经济学中常用的敏感性指数 (Coefficient of Sensitive, CS) 揭示生态系统服务价值随时间的变化对于价值指数的依赖程度, 以减少结果的不确定性。本文将各土地利用类型的生态服务价值系数 VC 分别增加或减少 50% 来计算 CS [36]。

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (8)$$

式中, VC_{ik} 和 VC_{jk} 代表调整前后的第 k 类生态系统单位面积生态服务价值系数; ESV_i 和 ESV_j 分别代表调整前后的生态服务总价值。 CS 为研究区各生态系统服务价值系数的敏感度。如果 $CS > 1$, 说明 ESV 对 VC 是富有弹性的, 则价值系数准确度差和可信度较低; 如果 $CS < 1$, 则说明 ESV 对 VC 是缺乏弹性的, 结果可信。

4 结果与分析

4.1 土地利用变化分析

4.1.1 土地利用结构演变特征

对土地利用数据进行统计, 得到博斯腾湖流域各地类面积 (表 2)。从结构看, 博斯腾湖流域 1995—2018 年土地利用结构以荒漠为主, 其次是草甸、裸地, 年平均面积比例为 30.47%, 24.15%, 23.16%, 而灌木和水田仅占 0.37%, 0.01%。在动态度和变化率上, 变化幅度较大的是建设用地、灌木和旱地, 变化率依次为 181.36%, 115.40%, 81.97%, 动态度依次为 7.81%, 4.96% 和 3.51%。

表 2 1995—2018 年博斯腾湖流域土地利用面积百分比和动态度

Table 2 Land use area percentage and dynamic degree in the Bosten Lake Watershed from 1995 to 2018

土地利用类型 Land use types	不同土地利用类型占比变化 Proportional change of different land use types/%						1995—2018 年变化率 Rate of change/%	单一土地利用动态度 Dynamic of single land use/%
	1995	2000	2005	2010	2015	2018		
荒漠 Desert	28.73	27.60	27.15	34.13	32.62	32.58	13.41	0.55
草甸 Meadow	23.06	23.86	23.08	24.88	25.01	25.03	8.47	0.34
裸地 Bare land	26.10	27.11	27.63	18.99	19.65	19.48	-25.35	-1.12
草原 Grassland	11.03	11.06	10.87	9.04	8.94	8.93	-19.04	-0.85
旱地 Dry land	4.03	4.06	4.99	6.34	7.39	7.52	81.97	3.51
湿地 Wetland	1.89	1.91	1.89	2.12	2.09	2.08	5.92	0.23
水域 Water area	1.45	1.61	1.56	1.67	1.68	1.79	24.11	1.01
冰川积雪 Glacier snow	1.83	1.25	1.20	1.34	1.25	1.18	-19.71	-0.88
针叶 Coniferous forest	0.77	0.70	0.70	0.47	0.63	0.63	-18.01	-0.81
阔叶 Broadleaf forest	0.73	0.70	0.79	0.64	0.38	0.38	-47.85	-2.09
建设用地 Construction land	0.24	0.28	0.33	0.49	0.65	0.67	181.36	7.81
灌木 Shrubland	0.16	0.53	0.51	0.33	0.34	0.34	115.40	4.96
水田 Paddy field	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	—	—

在不同的研究时期, 博斯腾湖流域各土地类型发生了不同程度的变化, 主要表现在旱地、建设用地面积持续增加; 荒漠、草甸、湿地、水域、灌木呈现波动增长趋势; 裸地、草原、冰川积雪、阔叶、针叶呈现波动下降趋势。

从具体的年际变化来看,旱地从 1995 年的 4.03%增加至 2018 年的 7.52%,尤其是在 2005—2010 年旱地面积增加迅速,建设用地的增加趋势与其基本一致。

4.1.2 土地利用转移特征

利用土地利用转移矩阵(表 3)对各地类转入和转出面积进行统计。根据表 3 可以看出博斯腾湖流域 1995—2018 土地利用主要特点:转入和转出面积最大的分别是荒漠和裸地,其次是草甸和草原。荒漠转入的面积达 $854.63\times 10^3\text{ hm}^2$,主要转入来源是裸地、草原和草甸;裸地的转出面积达 $922.05\times 10^3\text{ hm}^2$,23 年间主要转向荒漠和草甸。草甸转入的面积达 $703.81\times 10^3\text{ hm}^2$,主要转入来源是草原,其次是裸地;草原主要转向草甸,其次是荒漠。随着社会经济发展的发展,反应人类开发利用强度的主要地类有旱地和建设用地。旱地面积转入来源主要是荒漠、草原和草甸;建设用地的转入来源主要是荒漠和旱地,说明对荒漠进行了较大的开发利用。

表 3 1995—2018 年博斯腾湖流域土地利用转移矩阵/(10^3 hm^2)
Table 3 Conversion of different land use type in Bosten Lake Watershed from 1995 to 2018

2018	1995											
	冰川积雪 Glacier snow	草甸 Meadow	草原 Grassland	灌木 Shrubland	旱地 Dry land	荒漠 Desert	阔叶 Broadleaf forest	裸地 Bare land	建设用地 Construction land	湿地 Wetland	水域 Water area	针叶 Coniferous forest
冰川积雪 Glacier snow	—	0.03	0.26	0.00	0.00	0.12	0.00	39.84	0.00	0.00	0.00	0.01
草甸 Meadow	9.97	—	309.47	1.45	8.44	45.57	4.26	271.22	1.02	8.90	1.69	41.82
草原 Grassland	0.21	312.65	—	1.68	9.80	120.55	18.40	40.46	0.15	12.68	1.45	2.87
灌木 Shrubland	0.00	2.25	4.51	—	2.57	8.43	3.62	2.97	0.00	0.67	0.26	0.00
旱地 Dry land	0.00	24.21	87.10	3.50	—	157.68	13.90	19.70	6.92	5.29	1.62	0.27
荒漠 Desert	0.85	107.23	182.86	1.70	6.85	—	9.41	535.98	1.00	4.61	2.69	1.46
阔叶 Broadleaf forest	0.00	1.23	4.99	0.52	9.12	7.76	—	1.32	0.70	0.01	0.05	0.01
裸地 Bare land	58.45	51.21	77.58	1.81	0.55	194.44	1.61	—	0.25	0.35	0.09	2.01
建设用地 Construction land	0.00	1.03	1.37	0.13	19.02	19.40	1.40	1.43	—	0.00	0.34	0.03
湿地 Wetland	0.00	28.10	6.91	0.00	3.33	4.61	0.47	1.24	0.05	—	3.61	0.00
水田 Paddy field	0.00	0.11	0.17	0.00	0.20	0.07	0.00	0.87	0.00	0.03	0.05	0.00
水域 Water area	0.09	13.63	4.28	0.37	2.52	4.77	0.29	3.72	0.25	7.92	—	0.72
针叶 Coniferous forest	0.00	20.30	12.10	0.00	0.00	1.94	0.19	3.31	0.00	0.00	0.00	—

4.2 生态系统服务价值时空变化分析

4.2.1 生态系统服务价值数量动态变化

由表 4 和生态贡献率(图 2)可知,1995—2018 年博斯腾湖流域 ESV 总体上呈现减小-增大-减小-增大的波动增长趋势。流域生态贡献率总和为 52.36%,博斯腾湖流域 23 年间 ESV 总量增加了 50.9 亿元,增幅为 8.53%。导致 ESV 增益的地类有水域、草甸、旱地、荒漠、灌木、水田,生态贡献率之和为 76.18%,水域和草甸是流域主要的正向贡献因子;导致 ESV 损失的地类有草原、阔叶、冰川积雪、针叶,生态贡献率之和为 -23.82%,草原是流域主要的负向贡献因子。水域、草甸、旱地是流域 ESV 变化的主要贡献因子和敏感因子。

从不同土地利用类型来看(表4), 博斯腾湖流域 ESV 主要由草甸、水域和湿地构成, 平均占比分别为 37.13%、27.47%和 13.87%;ESV 较低的是灌木, 占总价值的 0.75%, 其次是裸地和水田, 分别占比 0.62%和 0.01%。从 ESV 的年际变化看, 1995—2000 年流域 ESV 增加了 17.90 亿元, 主要增加来源是水域生态系统服务价值;2000—2005 年流域 ESV 减少了 10 亿元, 这与 5 年间草甸和水域的面积减少呈正相关关系;2005—2010 年流域 ESV 年际变化增幅最大, 达 35.40 亿元, 这与草甸、水域和湿地面积的增加呈正相关;2010—2015 ESV 减少 2.25 亿元, 变化幅度较小;2015—2018 年流域 ESV 的增加主要来源是水域生态系统服务价值。

表 4 博斯腾湖流域不同生态系统类型的价值变化

Table 4 Ecosystem services value change of different ecosystem types in Bosten Lake Watershed

	生态系统服务价值 ESV/10 ⁸ 元						平均占比 Average proportion/%	生态系统服务价值变化量 Change of ESV/10 ⁸ 元				
	1995	2000	2005	2010	2015	2018		1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2018
草甸	222.18	228.29	220.85	238.60	239.44	239.47	37.13	6.11	-7.44	17.76	0.84	0.03
水域	153.09	169.34	163.68	176.03	176.63	188.78	27.47	16.25	-5.66	12.35	0.60	12.16
湿地	82.74	83.01	82.35	92.55	90.90	87.08	13.87	0.27	-0.66	10.20	-1.65	-3.82
草原	47.13	46.93	46.14	38.47	37.95	37.92	6.81	-0.20	-0.79	-7.67	-0.52	-0.04
荒漠	26.64	25.41	25.00	31.50	30.05	30.02	4.51	-1.23	-0.41	6.50	-1.45	-0.03
旱地	13.61	13.95	16.45	21.10	24.60	24.61	3.06	0.34	2.51	4.65	3.50	0.01
冰川积雪	19.18	12.43	13.40	14.70	13.72	15.30	2.37	-6.75	0.97	1.30	-0.98	1.58
阔叶	14.12	13.52	15.22	12.38	7.32	7.32	1.87	-0.60	1.70	-2.83	-5.06	0.00
针叶	11.44	10.22	10.23	6.98	9.32	9.32	1.54	-1.23	0.02	-3.25	2.34	0.00
灌木	2.00	6.78	6.48	4.26	4.29	4.28	0.75	4.78	-0.30	-2.22	0.03	0.00
裸地	4.40	4.54	4.63	3.19	3.29	3.26	0.62	0.14	0.09	-1.44	0.11	-0.03
水田	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
总计 Total values	596.53	614.43	604.43	639.83	637.58	647.43	100.00	17.90	-10.00	35.40	-2.25	9.85

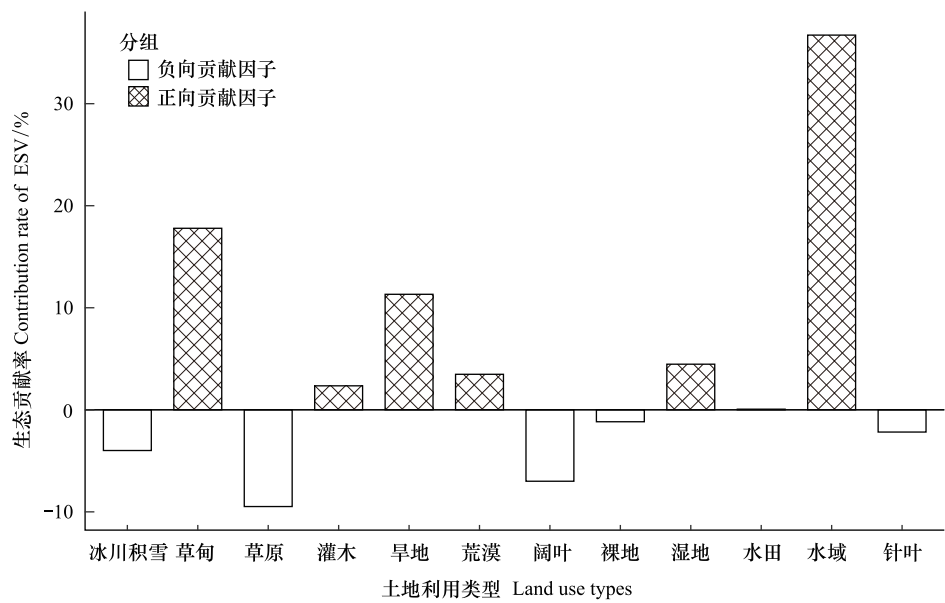


图 2 1995—2018 年博斯腾湖流域生态贡献率

Fig.2 Contribution rate of ecosystem services value of Bosten Lake Watershed from 1995 to 2018

从不同服务功能来看(表5), 调节服务平均占比最高, 占总价值的 70.30%, 其次为支持服务、供给服务和文化服务, 分别占比 17.32%、8.07%、4.31%。研究期内这四项服务的价值不同程度的增加, 其中调节服务

的价值变化量最大,且在整个生态系统服务功能中占优势地位。

表 5 博斯腾湖流域不同服务功能的生态系统服务价值
Table 5 Ecosystem Services Value of different service functions of Bosten Lake Watershed

服务功能类型 Service category	生态系统服务价值 ESV/10 ⁸ 元						1995—2018	
	1995	2000	2005	2010	2015	2018	平均占比/% Average proportion	变化量/10 ⁸ 元 Amount of change
供给服务 Provisioning services	48.24	47.70	47.89	51.96	52.45	53.64	8.07	5.39
调节服务 Regulating services	418.22	433.63	425.13	449.29	446.85	456.10	70.30	37.88
支持服务 Supporting services	103.98	106.42	105.18	110.83	110.78	110.35	17.32	6.37
文化服务 Cultural services	26.09	26.69	26.23	27.76	27.49	27.34	4.31	1.25

4.2.2 生态系统服务价值空间演变

(1)博斯腾湖流域生态系统服务价值总体空间分布(图 3)。为了凸显流域 ESV 的空间差异性,并参考相关研究^[37]构建 3 km×3 km 的格网为基本研究单元,计算 6 个时期生态系统服务价值的均值,并采用自然断点法将博斯腾湖流域 ESV 分成低、较低、中、较高和高 5 个等级。

从图 3 可以看出博斯腾湖流域 ESV 呈“北偏高,南偏低”总体空间分布规律,唯一高值集聚区(博斯腾湖)点缀在低值区。ESV 高值区和较高值区主要分布于博斯腾湖及周围湿地、开都河主干河道、和静县的巴音布鲁克湿地与草原地区;ESV 低值区范围最大,由裸地、荒漠等生态系统构成。研究区南部 ESV 明显特点是高值区、较高值区和中值区镶嵌于低值区,是由旱地、水田等人工生态系统分布于大面积的荒漠、裸地等自然生态系统中;研究区北部 ESV 特点是低值区镶嵌于较高值、中值和较低值区,由于高海拔草甸、草原、湿地、冰川积雪等自然生态系统使得北部生态系统服务价值高于南部,零散分布的低值区是冰川消融后的裸地地区。

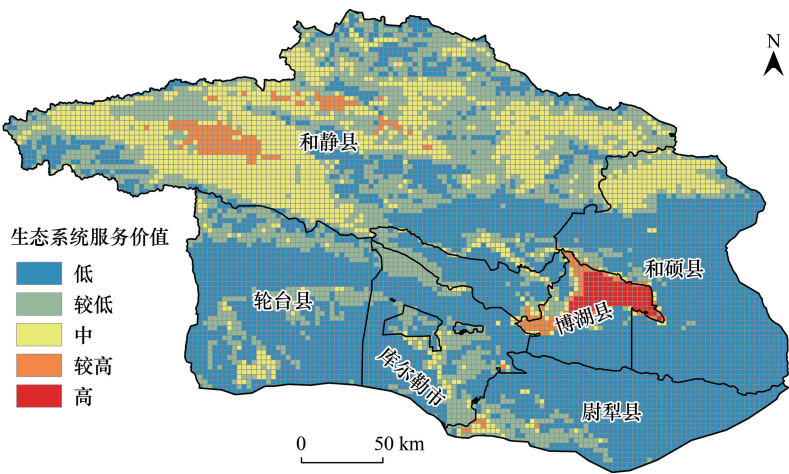


图 3 博斯腾湖流域生态系统服务价值空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service value in Bosten Lake Watershed

(2)热点分析。由图 4 可知,研究期内流域生态服务价值热点区域变化不大,冷点区面积大,呈缩减趋势。流域北部的 ESV 空间演变较为显著,其原因是荒漠和裸地、草原和草甸等自然生态系统转换频繁,导致大面积次冷点区转为不显著区域。研究区南部的绿洲区的扩张使得局部冷点区转为次冷点区。1995—2000 年热点区和冷点区变化不大,巴音布鲁克的湿地面积减少造成次热点区缩减;流域东北部和北部山区冰川积

雪面积的较少使得部分不显著区转化为次冷点区。2000—2005 年热点分析结果变化不大。2005—2010 年流域由于北部山区草甸面积的显著增加使得较大区域的次冷点区转换为不显著区,此外博斯腾湖周围的次热点区和次冷点区增大是由于博斯腾湖周围的湿地和旱地面积增大所致,导致 ESV 低值集聚区减小。2010—2018 年库尔勒市旱地的增大导致部分冷点区转化为次冷点区,在此期间修建的水库使得尉犁县出现了零星的次热点区。

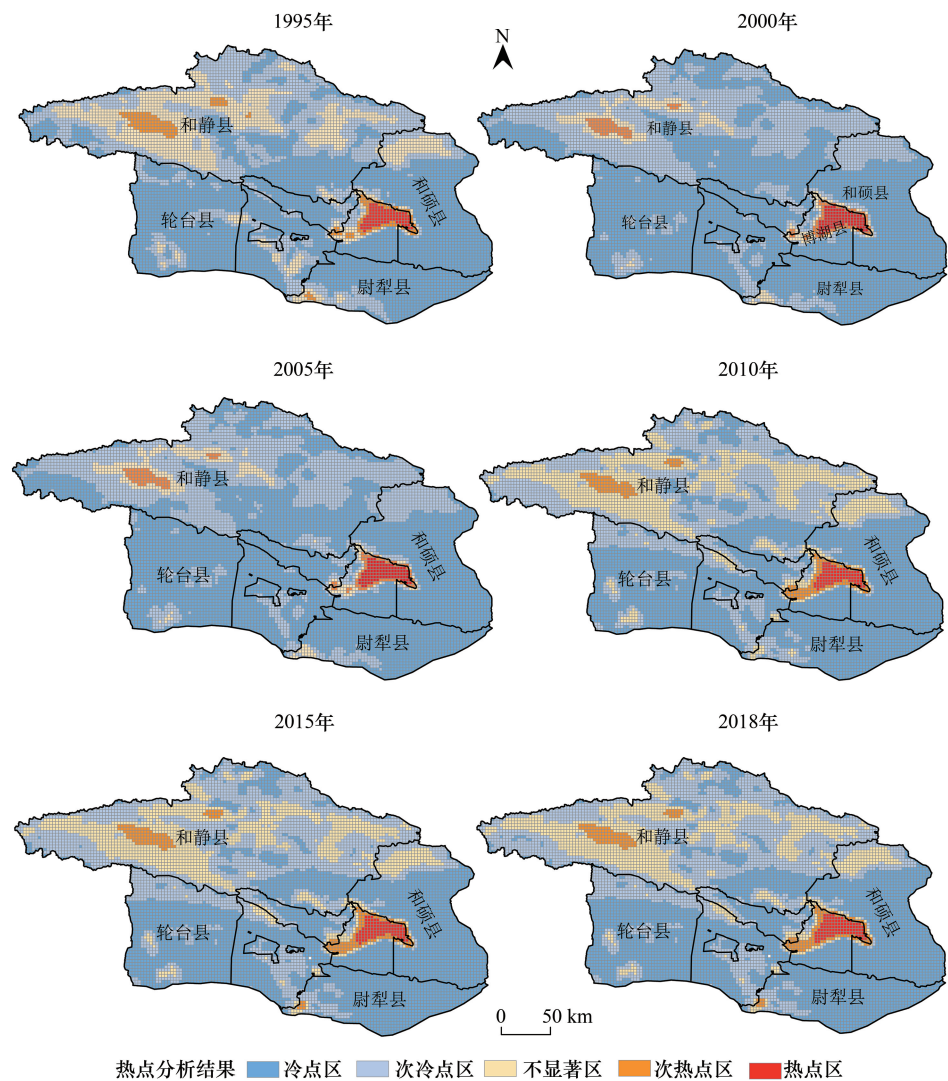


图 4 博斯腾湖流域生态系统服务价值空间演变

Fig.4 The spatial evolution of ecosystem service value in Bosten Lake Watershed

4.3 敏感性分析

从表 6 可以看出,不同土地利用类型的敏感性指数区别较大,但同一类型不同年份之间差别不大,且敏感性指数均小于 1。其中,草甸的敏感性指数最大;水田的敏感性指数最低。研究区生态系统服务总价值对价值系数缺乏弹性,因此本文计算所采用的价值系数适合博斯腾湖流域,研究结果可信。

5 讨论与结论

5.1 讨论

目前生态服务价值核算方法可分为基于单位服务功能价格的方法和基于单位面积价值当量因子的方

法^[27]。本文采用直观易用的当量因子法对博斯腾湖流域生态系统服务价值进行估算。在当量因子法中,根据优化的中国陆地生态系统服务价值当量因子及流域生态系统特点对土地利用类型进行细分,这一定程度上提高了评价结果的准确性;选择 1995—2018 的平均值为生态系统服务价值量,加强了生态系统服务价值时间序列上的可比性;同时方法上存在静态、没有考虑建设用地的生态系统服务价值等缺点。另外,本文选用的土地利用数据的解译精度、土地利用类型的分类等都影响了价值评估的精度。

表 6 1995—2018 年博斯腾湖流域生态系统服务价值敏感性指数
Table 6 Coefficient of Sensitive in Bosten Lake Watershed from 1995 to 2018

价值系数 Value coefficient	敏感性指数(CS) Coefficient of sensitive					
	1995	2000	2005	2010	2015	2018
旱地 Dry land (VC ±50%)	0.023	0.023	0.030	0.033	0.019	0.019
水田 Paddy field(VC ±50%)	—	4.9×10 ⁻⁶	5.0×10 ⁻⁶	9.8×10 ⁻⁵	9.7×10 ⁻⁵	9.5×10 ⁻⁵
针叶 Coniferous forest (VC ±50%)	0.019	0.017	0.017	0.011	0.015	0.014
阔叶 Broadleaf forest (VC ±50%)	0.024	0.022	0.025	0.134	0.011	0.011
灌木 Shrubland (VC ±50%)	0.003	0.011	0.011	0.007	0.007	0.007
草原 Grassland(VC ±50%)	0.079	0.076	0.076	0.060	0.060	0.059
草甸 Meadow (VC ±50%)	0.372	0.372	0.365	0.373	0.376	0.370
湿地 Wetland (VC ±50%)	0.139	0.135	0.136	0.145	0.143	0.135
荒漠 Desert (VC ±50%)	0.045	0.041	0.041	0.049	0.047	0.046
裸地 Bare land(VC ±50%)	0.007	0.007	0.008	0.005	0.005	0.005
水域 Water area(VC ±50%)	0.257	0.276	0.271	0.275	0.277	0.292
冰川积雪 Glacier snow (VC ±50%)	0.032	0.020	0.022	0.023	0.022	0.024

通过前文分析,博斯腾湖流域生态系统服务价值总体呈增长趋势,其中供给、调节、支持、文化服务均呈增长趋势。土地利用变化是生态系统服务价值变化的直接原因,博斯腾湖流域北部高海拔地区的冰川积雪、草甸、草原等受人类活动影响较小的自然生态系统,面积大且对气候变化较为敏感^[38]。研究期内,由于全球气候变暖且冰川消融导致的流域北部高海拔区域的草甸、草原等面积增大,是研究区北部生态系统服务价值整体增大的主要原因;在南部绿洲区的人工生态系统如:旱地、水库等面积扩张致使绿洲区局部的生态系统服务价值增大。可以发现西北干旱区生态系统服务价值的变化主要受气候的影响,在此背景下,人类活动使得绿洲区局部的生态系统服务价值增大或减小。由于本研究基于流域尺度,对绿洲区人工生态系统服务价值变化研究不够,今后的研究中可加强绿洲尺度和生态系统服务价值驱动力方面的研究。

人类活动对绿洲区的开发利用使得人工生态系统的结构和功能发生了变化,故可以通过相关举措来管理和调整绿洲土地利用。(1)干旱区的生态环境异常脆弱,水资源维系着农业生产、经济社会发展,是人类生存的命脉。本研究发现仅占流域总面积 3.61%的湿地和水域,主导着流域生态系统服务价值的变化,表明水域和湿地是流域环境保护和生态建设的重心。(2)城市的扩张使得绿洲区的生态系统价值降低,例如库尔勒市。政府应该严格控制建设用地的扩张,高度利用已建建筑,对建设用地实行集约化管理。(3)干旱区广袤的自然生态系统虽然不能被人类直接开发利用,但却关乎干旱区绿洲发展的各项福利;旅游、矿产资源等。例如本研究发现近二十年来博斯腾湖流域北部自然生态系统好转,水资源增多,这成为绿洲经济社会进一步合理发展的自然条件。

5.2 结论

(1)博斯腾湖流域 1995—2018 年土地利用以荒漠为主,其次是草甸、裸地,平均面积比例为 30.47%, 24.15%, 23.16%, 23 年间建设用地的变化幅度最大。流域各地类的转换以荒漠和裸地、草原和草甸为主,另外这四者之间的互相转换也较为频繁。反应人类开发利用强度的主要地类旱地和建设用地呈持续增长趋势。

(2) 1995—2018 年博斯腾湖流域 ESV 总体上呈现波动增长趋势,流域 ESV 主要由草甸、水域和湿地构成,平均占比分别为 37.13%、27.47%和 13.87%,调节服务价值变化量最大,且在生态系统服务功能中占优势

地位。博斯腾湖流域 ESV 总体空间分布呈“北偏高,南偏低”,唯一高值集聚区(博斯腾湖)在低值区的分布格局。

(3) 博斯腾湖流域各地类面积变化对流域 ESV 变化量的大小和方向产生了不同程度的影响,其中水域和草甸是流域 ESV 变化的主要正向贡献因子,草原是流域 ESV 变化的主要负向贡献因子。从土地利用空间变化对 ESV 的影响看,流域北部的荒漠和裸地转向草原和草甸等自然生态系统转换形成了 ESV 损失冷点区;研究区南部的人工生态系统面积(绿洲区)的扩张使得局部冷点区转为次冷点区。

参考文献(References):

- [1] 谢高地,肖玉,鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. 植物生态学报, 2006, 30(2): 191-199.
- [2] 涂小松, 龙花楼. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化. 资源科学, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [3] Santos-Martín F, Zorrilla-Miras P, Palomo I, Montes C, Benayas J, Maes J. Protecting nature is necessary but not sufficient for conserving ecosystem services: a comprehensive assessment along a gradient of land-use intensity in Spain. *Ecosystem Services*, 2019, 35: 43-51.
- [4] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [5] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [6] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [7] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 刘江. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, 2010, 65(6): 708-714.
- [8] 潘洪义, 张琴, 李加安, 徐婕, 黄佩. 基于动态当量的彝汉交错深度贫困区生态系统服务价值时空演变研究. 生态学报, 2020, 40(22): 8212-8229.
- [9] Hu M M, Li Z T, Wang Y F, Jiao M Y, Li M, Xia B C. Spatio-temporal changes in ecosystem service value in response to land-use/cover changes in the Pearl River Delta. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 106-114.
- [10] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [11] 肖红克, 李洪忠, 王莉, 陈劲松, 韩宇. 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. 水土保持研究, 2020, 27(1): 290-297.
- [12] Liu Y B, Hou X Y, Li X W, Song B Y, Wang C. Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106004.
- [13] 李子君, 刘金玉, 姜爱霞, 于元赫. 基于土地利用的祁河流域生态系统服务价值动态变化. 水土保持研究, 2020, 27(2): 269-275, 283-283.
- [14] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, V. O'Neill R, 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] Daily G C. *Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D C: Island Press, 1997: 49-70.
- [16] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [17] 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.
- [18] 刘玉卿, 张华兵, 张云峰. 盐城海岸带生态系统服务价值时空分异. 浙江农林大学学报, 2019, 36(4): 774-782.
- [19] 杨延成, 阿里木江·卡斯木, 祖拜旦·阿克木, 买尔孜牙·吾买尔. 干旱区绿洲灌溉条件下生态服务价值研究——以新疆轮台县为例. 冰川冻土, 2019, 41(4): 1005-1014.
- [20] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. 生态学报, 2019, 39(3): 823-834.
- [21] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 王宽, 齐增湘, 李晖, 陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [22] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [23] 程静, 黄越. 宁夏回族自治区生态系统服务价值时空演变及其驱动力. 水土保持研究, 2021, 28(2): 382-389.
- [24] 耿甜伟, 陈海, 张行, 史琴琴, 刘迪. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1714-1727.

- [25] 王云, 潘竟虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3455-3467.
- [26] 黄傅强, 王志远, 刘慧, 齐增湘, 吴欣昕. 基于生态系统服务价值的城市增长边界划定研究: 以衡阳市中心城区为例. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1115-1125.
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [28] 玛地尼亚提·地里夏提, 玉素甫江·如素力, 姜红. 2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2018, 38(19): 6921-6931.
- [29] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>), 2018, doi: 10.12078/2018070201.
- [30] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [31] Tan Z, Guan Q Y, Lin J K, Yang L Q, Luo H P, Ma Y R, Tian J, Wang Q Z, Wang N. The response and simulation of ecosystem services value to land use/land cover in an oasis, Northwest China. Ecological Indicators, 2020, 118: 106711.
- [32] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [33] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [34] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 汉中市土地利用时空变化及其对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2020, 27(1): 275-282.
- [35] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. 生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [36] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 冯少茹. 近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测. 地理研究, 2019, 38(11): 2790-2803.
- [37] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 李颜颜, 张宇, 秦明周. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变. 农业工程学报, 2020, 36(11): 277-288.
- [38] 哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 海米提·依米提. 新疆焉耆盆地人类活动与气候变化的效应机制. 生态学报, 2016, 36(18): 5750-5758.