

DOI: 10.5846/stxb201708221512

马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,依克丽曼·阿布都米提,马春玥,依尔夏提·阿不来提.基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究.生态学报,2018,38(16): - .

Mayila R H M, Mamat S W T, Nigela T X P L T, Yikiliman A B D M T, Ma C Y, Yierxiati A B L T. The ecosystem service value spatial-temporal changes in the Ugan-kuqa River Delta oasis based on RS and GIS. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究

马依拉·热合曼^{1,2}, 买买提·沙吾提^{1,2,3,*}, 尼格拉·塔什甫拉提^{1,2,3}, 依克丽曼·阿布都米提^{1,2}, 马春玥^{1,2}, 依尔夏提·阿不来提^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:生态系统服务价值(ESV)研究是改善土地利用方式,对促进地区生态系统保护和修复具有重要指导意义。选择生态环境较为脆弱的渭库绿洲为研究区域,以 1994 和 2016 年遥感影像为基础数据进行生态服务价值评估,应用格网、敏感性分析、空间自相关等空间统计学方法来进一步揭示研究区域生态系统服务价值(ESV)动态变化特征。结果表明:(1)1994—2016 年间渭库绿洲土地利用变化/土地覆被变化较为显著,耕地,建设用地面积呈增长趋势,水域、草地和未利用地面积呈递减趋势,耕地和草地面积变化最为剧烈。(2)1994—2016 年,渭库绿洲的生态系统服务总价值呈减少趋势,由 4895.67×10^6 元减少到 3864.78×10^6 元,减少了 1030.89×10^6 元,年均减少 0.96%;空间上表现为生态服务价值增值区及减值区呈包围态势,生态系统服务高值区域在不断缩小;同时生态系统单项服务价值呈现有增有减的趋势,废物处理、水源涵养、生物多样性保护、娱乐文化等四项单项服务价值呈现下降趋势,而食物生产、气候调节、气体调节和原材料、土壤形成与保护等其他五项单项服务价值出现上升趋势。(3)敏感性分析表明,所有土地利用类型生态系统服务价值系数的敏感性指数(CS)均小于 1,说明生态价值系数(VC)对生态系统服务价值的变化影响较小,模型能够合理评估该区域生态服务价值波动。(4)研究区生态系统服务价值表现出明显的空间自相关与空间聚集现象,生态服务价值高值聚集区主要分布在渭干河上游“克孜尔水库”周围和塔里木河北岸,并呈减少趋势,注意保护高值区的空间稳定性;低值聚集区主要集中在绿洲南部靠近塔克拉玛干沙漠边缘和北部靠近天山中部的山区以及库车河下游荒漠区域,这类区域在空间范围上呈连片连绵趋势,空间分布格局上基本保持稳定。(5)受气候变化和人类活动的双重影响下,草地和水域面积的大幅度下降,耕地和建设用地面积的增加,导致生态服务价值系数较高的土地越来越少,使得研究区的生态服务价值趋于减弱。

关键词:渭库绿洲;土地利用/土地覆被;时空变化;生态系统服务价值(ESV);敏感系数;空间自相关

The ecosystem service value spatial-temporal changes in the Ugan-kuqa River Delta oasis based on RS and GIS

MAYILA Rehehan^{1,2}, MAMAT Sawut^{1,2,3,*}, NIGELA Taxipulati^{1,2,3}, YIKILIMAN Abudoumiti^{1,2}, MA Chunyue^{1,2}, YIERXIATI Abulait^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology at Xinjiang University, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory for Wisdom City and Environmental Modeling, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

基金项目:国家自然科学基金(41361016,40901163,41761077);新疆大学博士启动基金(BS120116, No.XY110117)

收稿日期:2017-08-22; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: korxat@xju.edu.cn

Abstract: Ecosystem services value (ESV) research is an important way to improve land use patterns and to promote the protection and restoration of regional ecosystems. This study choose the fragile ecological environment of the Ugan-Kuqa River delta oasis as a study area, using remote sensing images in 1994 and 2016 as the basic data to assess the value of ecosystem services. To further investigate dynamic change characteristics of regional ecosystem service values, the grid, sensitivity analysis, spatial autocorrelation, and spatial statistical methods were applied. The results revealed that: (1) 1994—2016 Ugan-Kuqa River delta oasis land use changed, and land cover changed was more significant. Cultivated land and construction land showed an increasing trend, whereas grassland and unused land showed a declining trend. Cultivated land and grassland changed most rapidly. (2) From 1994 to 2016, the total value of ecosystem services in the Ugan-Kuqa River delta oasis decreased from 4895.67×10^6 yuan to 3864.78×10^6 yuan, being reduced by 1030.89×10^6 yuan, an annual reduction of 0.96%; in spaces where the ecological service value added area in the impairment area were in a situation of encirclement. Areas of high ecosystem service value were shrinking. At the same time, the value of ecosystem individual services presented an increasing and decreasing trend. Four single service values, such as waste treatment, water conservation, biodiversity protection, and recreational culture, there was a downward trend. However, food production, climate regulation, gas regulation and raw material, soil formation, and protection, and an additional five individual service values showed an upward trend. (3) The sensitivity analysis revealed that the sensitivity index of ecosystem service value coefficient (CS) of all land use types were less than 1, indicating that the ecological value coefficient (VC) had little influence on the changes of ecosystem service values, the model can reasonably evaluate the fluctuation of regional ecosystem service values. (4) The ecosystem service value of the study area showed obvious spatial autocorrelation and spatial clustering, ecological service value high accumulation areas were mainly distributed in the Ugan-Kuqa River upstream, in the "Kezier reservoir" around and north shore of the Tarim River and showed a decreasing trend. Protection of the spatial stability of the high value area must be considered; the low accumulation area mainly concentrated in the southern part of the oasis was close to the edge of the Taklimakan Desert and near the Tianshan Mountain central area and desert area of the lower reaches of the Kuqa River. The spatial distribution pattern of this kind of area is basically stable. (5) Affected by climate change and human activities, the grassland and water area was greatly reduced and construction land and cultivated land was increased, resulting in the land with higher ecological service value coefficient being continuously reduced, which causes the ecological service value of the study area tend to weaken.

Key Words: Ugan-kuqa River Delta Oasis; land use/land cover; Temporal and spatial change; ecosystem service value (ESV); sensitive coefficient; spatial autocorrelation

土地利用/覆盖变化(Land use and Land cover, LULC)是人与自然交叉最为密切的环节,已成为全球环境变化研究的前沿和热点课题^[1],LULC 通过改变生态系统的结构、过程和功能,在生态系统维持其服务功能方面起重要作用^[2]。因此,研究土地利用/覆盖变化对生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)产生的影响具有重要的意义^[3]。近年来,国内外众多学者在生态系统服务内涵、类型划分及其价值评估方法等多方面进行了大量研究,并取得了一定的成果^[4-13]。如美国生态学家 Costanza 人就对全球生态系统服务价值进行分类,并提出了估算方法,引起了国内外学者的广泛关注^[4]。另外, Daily 等^[5]、David 等^[6]、Holmes 等^[7]、Swift 等^[8]、Yue 等^[9]、Dale 等^[10]对生态系统服务价值的理论、评价、核算方法和应用等方面开展了广泛而深入的研究。国内方面,欧阳志云^[11]等人利用生态学和经济学方法,对中国陆地生态系统服务功能及其生态价值进行研究,得出中国陆地生态系统具有巨大的生态经济效益,对维持我国社会经济的可持续发展有不可替代的作用等结论;谢高地^[2]等考虑中国国情利用专家知识对该方法进行了改进,建立了中国不同陆地生态系统单位面积生态系统服务价值,计算出各地类单位面积上不同功能的生态系统服务价值的总和;石焱等^[12]对中国 1998—2008 年来陆地生态系统服务功能所导致的价值变化进行了时空变化与影响因素研究,揭示了中国生态系统服务价值的空间格局及其变化特征。这些研究有效推动了生态系统服务价值研究在国内的快

速传播和发展。随着研究的逐步深入以及 3S 等空间技术的快速发展,国内众多学者围绕森林^[13]、湿地^[14]、草地^[15]、河流^[16]以及农田^[17]等不同类型的生态系统、在区域^[18]、流域^[19]以及城市^[20]等不同尺度下生态系统服务价值评估等方面开展了研究,进一步推进了生态系统服务价值的评估研究进程。

渭干河-库车河三角洲绿洲位于新疆塔里木盆地北缘,是典型农业绿洲。它不但是阿克苏地区土地开发利用较早的灌溉区及新疆重要的产棉区之一,也是塔里木石油天然气开发的主要地区^[21],具有自然灾害频繁和生态环境脆弱特点^[22]。受长期农耕活动和水土资源开发利用的影响,该绿洲土地利用导致的生态环境问题日渐突出^[23]。前人对于该绿洲的研究多集中于绿洲土地利用动态变化方面^[24-26]、且现有的生态服务价值研究^[27-29],从研究尺度和内容上来看,生态服务价值变化分析缺乏时空视角,尤其是对生态系统服务价值在空间上的聚集规律、关联模式等分布特征的定量研究尚显不足,而这种研究对揭示生态系统服务价值的空间格局及其变化特征与机制很重要^[30]。本研究基于渭库绿洲 1994 和 2016 年两期的遥感影像数据,利用生态价值评估模型及 GIS 空间统计方法,对渭库绿洲生态系统服务价值的时空变化规律进行研究,旨在为干旱区典型绿洲土地资源可持续利用和生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

渭干河-库车河三角洲绿洲(以下简称渭库绿洲)位于塔里木盆地北部的冲洪积平原,地理坐标介于 81°25′—83°16′E、41°05′—41°39′N 之间,南临塔里木河北岸,北抵秋里塔格山,西与温宿县相接,东与轮台县相邻,行政区划上隶属于库车、沙雅、新和三县(图 1),土地总面积约 523.75 万 hm^2 ,占全省土地面积的 3.16%,其中绿洲土地总面积约为 56.09 万 hm^2 ,占全疆绿洲面积的 3.8%^[27]。该绿洲属于大陆性温暖带干旱气候,年均气温 10.5—11.4℃,年平均降水量 51.6 mm,年平均蒸发量达 2123.7 mm,干旱指数为 17.3—21.8^[31]。该绿洲地势北高南低,地形坡降 1%—4%,东西宽约 194 km,南北长约 322 km,平原区海拔在 940—980 m。种植业是渭库绿洲经济的主导产业,农业主要依赖中高山地区流下的渭干河、库车河和塔里木河进行灌溉^[32]。土地利用类型主要包括农田、林地、草地、荒地、盐渍地等;作物主要包括小麦、玉米、棉花、油菜等。由于降水稀少,蒸发量强,耕地经过蒸发后,大量的水分被吸走,而含在水中的盐分滞留了下来。这种独特的气候造成该绿洲大面积耕地被盐渍化,土壤有机质含量低,中低产田面积广。土壤以轻壤土和沙壤土为主,土壤盐分多以氯化物、硫酸盐为主^[33]。

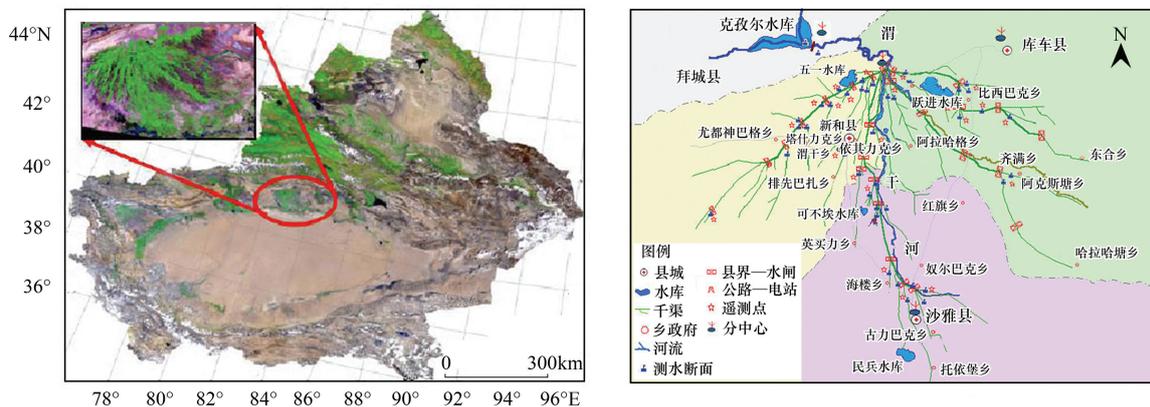


图 1 渭-库绿洲示意图

Fig.1 Location map of the Ugan-Kuqa river delta oasis

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

研究区选择渭库绿洲 1994 年 8 月 22 日 Landsat TM(30 m 分辨)和 2016 年 7 月 15 日的 Sentinel2(10 m 分

辨)影像为遥感信息源。采用 ENVI5.1 软件利用 6S 模型对两景影像进行大气校正,同时以研究区域 1:25 万地形图为参考,选择三次多项式和最近邻域插值法进行几何校正,再对校正后的影像数据进行波段选择与组合(假彩色 $R_{TM4}G_{TM3}B_{TM2}$)和统一投影系统等,得到研究区域的遥感影像。据研究区土地利用的实际情况以及参照《土地利用现状调查技术规程》和相关研究^[26,34]将研究区的土地利用分为耕地、草地、水域、建设用地和未利用地等 5 种类型(图 2),采用最大似然分类方法和人机交互相结合的方法对影像进行分类,提取 22 年来各期影像的土地利用类型数据。通过随机取样方法对分类结果进行精度检验,kappa 系数分别为 0.91,0.82,均高于 0.80,可以达到研究所需要求。

2.2 生态系统服务价值的评价法

本研究运用谢高地等^[11]的研究成果,结合研究区域具体情况,参考相关研究^[4,13],采用生态服务价值(ESV)的区域修正系数(即将价值系数与地区修正系数,新疆省为 0.58)相乘,考虑到建设用地在水分供应和废物处理方面对生态系统的负面影响,采用更换成本法估算建设用地的生态服务价值^[35],可得生态系统服务价值系数(VC)表 1,如表 1 所示。ESV^[19]的计算公式为:

$$ESV = \sum_{k=1}^n (A_k \times VC_k) \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (2)$$

式中,ESV 为生态系统服务价值; A_k 是土地利用类型 k 的面积(hm^2); VC_k 是生态系统价值系数($\text{元 hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); ESV_f 为生态系统第 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($\text{元 hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

表 1 渭库绿洲各地类生态系统单位面积服务价值系数($\text{元 hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 1 Ecosystem service value coefficients per unit area of land use categories in Ugan-kuqa River Delta Oasis

生态系统服务功能 Ecosystem services function	土地利用类型 Land use type				
	耕地 Cultivated land	草地 Grass land	水域 Water body	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
气体调节 Gas regulation	256.592	410.582	0	0	0
气候调节 Climate regulation	456.75	461.912	236.06	0	0
水源涵养 Water conservation	307.922	410.582	10459.26	-3966.16	15.37
土壤形成与保护 Soil formation and protection	749.302	1000.79	5.104	0	10.266
废物处理 Waste treatment	841.696	672.336	9330.228	-1740.41	5.104
生物多样性保护 Biodiversity protection	364.588	559.236	1277.914	0	174.464
食物生产 Food production	513.242	153.99	51.33	0	5.104
原材料 Rawmaterials	51.33	25.636	5.104	0	0
娱乐文化 Recreational culture	5.104	20.532	2227.316	0	5.104
合计 Sum	3546.526	3715.596	23592.31	-5706.56	215.412

本文利用生态系统服务价值动态度(k_{ESV})分析研究区域生态系统服务价值变化差异和变化趋势^[13],其计算公式为:

$$K_{ESV} = \frac{ESV_b - ESV_a}{ESV_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ESV_a 为研究初期某区域或地类的 ESV; ESV_b 为研究末期某区域或地类的 ESV; T 为研究时段。若 $k > 0$,

生态系统服务价值呈增加趋势; $k < 0$,生态系统服务价值呈减少趋势; $k = 0$,生态系统服务价值不变^[36]。

为了定量分析研究区生态服务价值的空间特征,将研究区划分为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 大小网格单元,分别计算每个格网的生态服务总价值,建立生态系统服务价值空间格局图。

2.2.1 敏感性指数

相关研究表明^[37-38],敏感性指数(Coefficient of Sensitive, CS)能够反映生态系统服务价值(ESV)对生态价值系数(VC)的依赖程度。CS 的计算公式为:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (4)$$

式中,CS 敏感性指数; i 和 j 分别是初始价值和生态价值系数调整后的价值。当 $CS < 1$,表明生态系统服务价值对于生态价值系数是缺乏弹性的;当 $CS > 1$,表明生态系统服务价值对于生态价值系数是富有弹性的,比值越大,表明生态价值系数的准确性越关键^[39]。

2.2.2 空间自相关

(1)局部空间自相关指标(Local indicators of spatial association, LISA)。

全局空间自相关是对整个研究空间的一个总体描述,仅仅对同质的空间过程有效,不能有效反映局部区域单元的空间自相关性^[40]。因此,本文局部空间自相关指标(LISA)和 Moran 散点图相结合的方法,进行局部空间自相关分析。

空间位置为 i 的局部 Moran's I 的计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n} \quad (5)$$

式中, I 为 Moran 指数; x_i, x_j 分别为空间单元 i, j 的 ESV 值; \bar{x} 为 ESV 均值; w_{ij} 空间权重矩阵; n 为空间单元个数。Moran 指数 I 的取值一般在 $[-1, 1]$ 间,大于 0 表示空间单元高-高值或低-低值的空间聚集,小于 0 表示空间单元高-低或低-高值的空间聚集等于 0 表示不相关^[30]。

(2)Moran 散点图可用来表达生态系统服务价值的标准化向量 ESV(横轴)与它的空间滞后向量 W_ESV (纵轴)之间的相关关系。Moran 散点图的四个象限,分别对应于区域单元与其邻居之间四种类型的局部空间联系形式,分别为“高高(HH)”、“高低(HL)”、“低高(LH)”和“低低(LL)”。HH 类型和 LL 类型为正的空间自相关关系,表示空间单元和周边单元的空间差异程度小,而 HL 类型和 LH 类型为负的空间自相关关系,表示空间单元和周边单元的空间差异程度大。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化

研究区土地利用面积变化见表 2。从表 2 可以看出 3 个特点。首先,研究区域主要的土地利用类型为草地和耕地分别占研究区土地面积的 $41.16\%—36.34\%$, $16.5\%—27.88\%$,两者的面积之和约占整个研究区域面积的 $57.66\%—64.22\%$,表明这 2 种土地利用类型所占比重较大,具有主体地位。

第二,1994—2016 年渭库绿洲土地利用类型的面积均发生了不同程度的变化,呈现 2 增 3 减趋势:建设用地和耕地均有所增加,其变化率均为正,说明该土地利用类型为正向变化,总体增加。面积增加速度为建设用地 > 耕地,其中建设用地增加速度最为明显。说明在这期间,研究区域城镇化速度较快。另外,草地,水域和未利用地有所减少,其变化率为负,说明呈负向变化,总体减少。面积减少速度依次为水域 > 草地 > 未利用地,其中草地减少面积最为明显。

第三,在 5 类土地利用类型中,耕地由 246451.8 hm^2 增加到 416289.55 hm^2 ,变化量为 169837.74 hm^2 ,是区

域面积变化最大的土地利用类型,说明该期间,农业用地变化趋势较为剧烈。

总之,各类土地利用/覆盖类型的时空变化各不相同。其中,耕地的时空动态在处于净增加趋势,水域和草地的动态基本上呈现减少趋势。这说明研究区耕地和水资源之间的矛盾是该区社会经济发展中的关键问题之一。

表 2 渭库绿洲 1994—2016 年土地利用类型变化

Table 2 Land use type changes in Ugan-kuqa River Delta Oasis during 1994—2016

类型 Type	1994	2016	变化面积 Change area hm ²	变化率 Change rate %
	hm ² /%	hm ² /%		
耕地 Cultivated land	246451.8/(16.5)	416289.55/(27.88)	169837.74	0.69
草地 Grass land	614538.56/(41.16)	542550.5/(36.34)	-71988.05	-0.12
水域 Water body	68763.26/(4.60)	13455.58/(0.90)	-55307.68	-0.80
建设用地 Construction land	900.47/(0.06)	9639.31/(0.64)	8738.84	9.70
未利用地 Unused land	562295.15/(37.66)	510944.96/(34.22)	-51350.19	-0.09

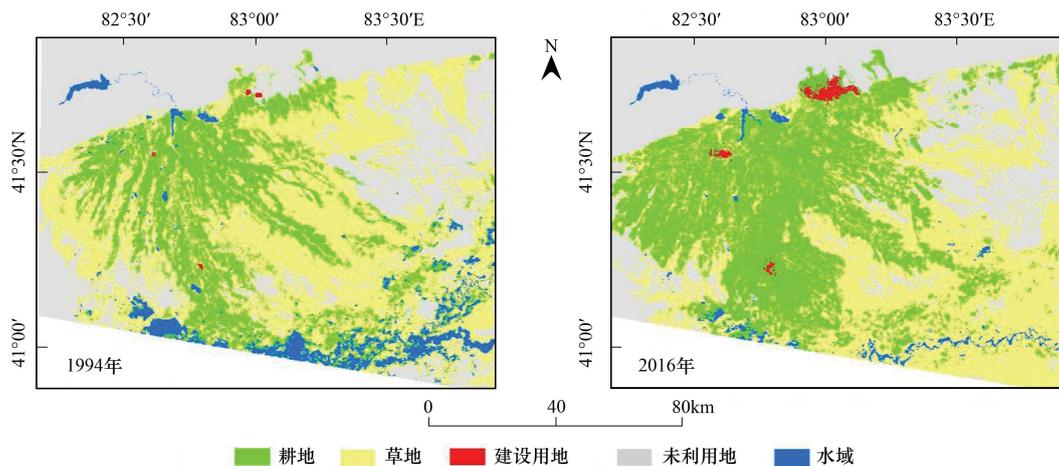


图 2 渭库绿洲土地利用-土地覆盖图

Fig.2 Land use and land cover types in Ugan-kuqa River Delta Oasis

3.2 生态系统服务价值动态变化

研究区 1994 年和 2016 年的 ESV 计算结果及 ESV 空间分布见表 3 和图 3。由表 3 可知,在 1994—2016 年间对渭库绿洲生态系统服务总价值贡献最大的两种土地利用类型是草地和水域,两者的合计贡献量达 80%—60%,其次是耕地为 18%—38%,未利用地和建设用地贡献较小。研究区总生态系统服务价值(ESV)呈减少趋势,由 4895.67×10^6 元减少到 3864.78×10^6 元,减少了 1030.89×10^6 元,年均减少 0.96%。总体来说,生态系统服务价值呈现两增三减的趋势:草地、水域、未利用的动态度 K_{ESV} 都小于 0,表明 ESV 总体减少,其中草地减少最多,其次为水域;耕地和建设用地的动态度 K_{ESV} 都大于 0,表明 ESV 总体增加,其中耕地 ESV 增加最多,增幅为 3.13%,建设用地 ESV 增加速度更快。通过以上分析并结合上述土地利用变化分析,可以发现,研究区域 ESV 降低主要是由于对研究区内草地的过度开垦以及水域面积的大幅衰减,使得绿洲生态系统服务价值从 1994 年开始下降,2016 年的绿洲生态服务价值低于 1994 年的生态服务价值。

从研究区生态系统服务价值的空间分布可以发现(图 3),研究区生态系统服务价值 ESV 都具有一定的空间差异。研究区生态服务价值较高地区(ESV 超过 0.4×10^6 元)主要分布在渭干河上游“克孜尔水库”周围区域和塔里木河北岸等,该区域属于水资源较为丰富、草地和水域面积占比高,草地在生态服务价值计算模型中的权重较大,从而使该区域生态服务价值最高;另外,生态服务价值最高区域从 1994—2016 年逐渐缩小,且

表 3 渭库绿洲 1994—2016 年各地类生态系统服务价值(ESV)变化
Table 3 Changes in ecosystem service value(ESV) of Ugan-kuqa River Delta Oasis during 1994—2016

类型 Type	1994(ESV _a)	2016(ESV _b)	变化量	动态度	标志 Sign
	10 ⁶ 元	10 ⁶ 元	10 ⁶ 元	K _{ESV} (%)	
耕地 Cultivated land	874.04/(17.85)	1476.38/(38.20)	602.34	3.13	▲
草地 Grass land	2283.37/(46.64)	2015.90/(52.16)	-267.47	-0.53	▽
水域 Water body	1622.28/(33.14)	317.45/(8.21)	-1304.83	-3.66	▽
建设用地 Construction land	-5.14/(-0.10)	-55.01/(-1.42)	-49.87	44.10	▲
未利用地 Unused land	121.12/(2.47)	110.06/(2.85)	-11.06	-0.42	▽
合计 Sum	4895.67	3864.78	-1030.89	-0.96	▽

▲:生态服务价值增加;▽:生态服务价值减少

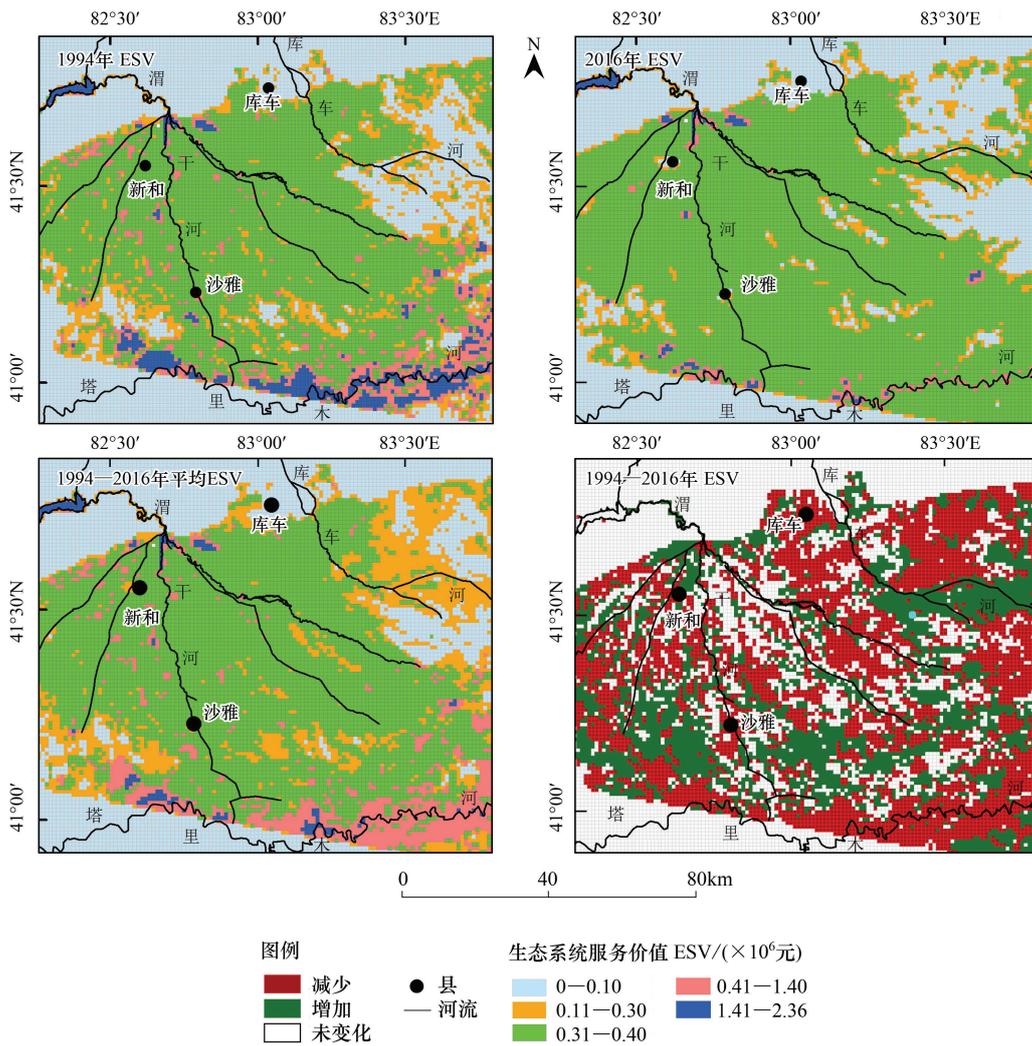


图 3 渭库绿洲生态系统服务价值空间变化

Fig.3 Ecosystem service value space distribution change in Ugan-kuqa River Delta Oasis

离散度变高,其中 1994 年的生态服务价值(ESV 超过 1.4×10^6 元)的区域有一定分布,而到 2016 年仅存于渭干河上游“克孜尔”水库周边区域;生态服务价值最低地区(ESV 低于 0.1×10^6 元)集中分布在绿洲南部靠近塔克拉玛干沙漠边缘和北部靠近天山中部的山区以及库车河下游荒漠区域,该区土地利用类型主要以未利用地为主,水资源较为匮乏、自然环境较差,导致该区域生态系统服务价值很低;并且,人类活动干扰程度低,所以生

态服务价值从 1994—2016 年未发生显著变化;生态服务价值(ESV 在 0.31×10^6 元— 0.4×10^6 元)的区域分布最多,主要集中在渭干河平原灌区、库车灌区、沙雅灌区等农业种植区,且 2016 年明显多于 1994 年,这主要是因为该区域地势平坦、具有较完善水利设施,适宜农业耕作,同时人口密度高,对自然生态系统的干扰程度大,导致该区域生态服务价值介于高低之间,且向周围不断扩张。生态服务价值(ESV 在 0.11×10^6 元— 0.3×10^6 元)的区域相对较少且呈零星点状分布在绿洲西南部和东部地区,该区域属于村居民用地以及未利用地,而这些土地利用类型在生态服务价值计算过程中的权重较低,导致该区域指数也偏低。

从生态服务价值增减区域变化来看(图 3),减少区域较多且主要分布在库车县的东北,即乌尊镇、亚哈真等地区和新和县西和东南,即塔什力克乡、尤都神巴格乡、依其力克乡等地。另外,还有沙雅县的南部和东南部等地区,即塔里木乡、新垦农场、盖孜库木乡等地区;生态服务价值增加区域相对较少且主要分布库车县东南的东阔坦镇和新河县的北部“五一水库”周围及沙雅县的西部英买力乡,努尔巴克乡等均有分散性增加区域。

整体上来说,生态系统服务价值量减少的区域比增加的区域多,增值区及减值区呈包围态势,生态系统服务高值区域在不断缩小,且塔里木河北岸地区生态服务价值减少量相对较多,要注重生态保护和生态恢复建设。

3.3 单项生态系统服务价值变化分析

研究区域生态系统 1994—2016 年单项服务价值的分布情况(图 4),各项功能的构成比例变化呈现一定差异,其中废物处理、水源涵养、土壤形成与保护、生物多样性保护四项对总生态系统服务价值的贡献最大,合计贡献率为 76.42%—70.11%;其次是气候调节、气体调节、食物生产、娱乐文化四项所占比例 22.99%—28.97%;原材料的所占比例很小,在 0.58%—0.91%之间。其中,食物生产、气候调节、气体调节和原材料、土壤形成与保护增加,其它服务功能均有所减少,这与该时期具有重要生态系统服务功能的草地和水域面积均减少以及耕地和建设用地增加有关。

3.4 敏感性分析

本文将各类土地利用类型的价值指数分别调整 50% 衡量总生态系统服务价值变化^[18],计算结果及敏感性指数如表 4 所示。生态服务价值系数(VC)对于生态系统

服务价值(ESV)变化的影响,使用敏感性指数(CS)来表达,计算结果如表 4 所示。结果表明,所有土地利用类型生态系统服务价值系数的敏感性指数(CS)均小于 1,表明渭库绿洲两期土地利用类型的 ESV 对 VC 缺乏弹性,也就是即使 VC 具有不稳定性,但研究区 ESV 仍是稳健的,这说明生态价值系数对生态系统服务价值的变化影响较小。建设用地的敏感性指数最小而草地最大,说明草地对生态系统服务价值的贡献最大。另外,从不同时期的敏感性指数变化来看,由于耕地面积增加较大,其 CS 值增加较为明显,其余的敏感性指数减少。未利用地,建设用地的敏感性指数接近 0,两个地类的 VC 变化对研究区生态系统服务价值的变化影响不大。敏感性分析表明,采用的生态服务价值系数适合研究区当地实际情况,研究结果可信。

3.5 空间自相关性

由图 5 可见,散点图定性地区分出每个格网单元与周围邻近单元单位面积生态服务价值间的相互关系,在图中,研究区 2 个年份空间自相关系数 Moran's I 均为正,且大于 0.7,表明研究区生态系统服务价值 ESV 分布空间相关性较高;在变化趋势上, Moran's I 由 1994 年的 0.807 下降到 2016 年的 0.746,说明近 22 年来研究区 ESV 空间自相关性趋于减弱;研究区域生态服务价值散点主要分布在第一和第三象限,第二和第四象限

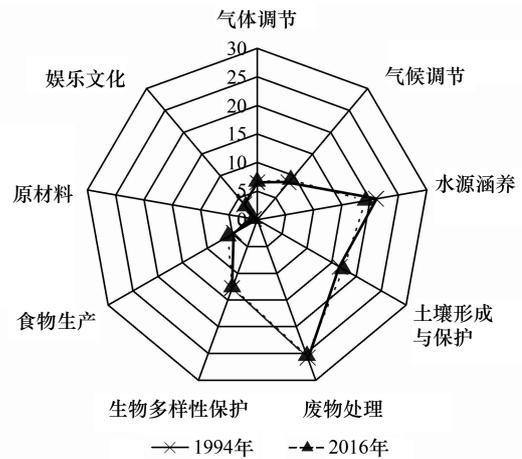


图 4 渭库绿洲单项生态系统服务价值变化
Fig. 4 Change of Structure of ecosystem service value in Ugan-kuqa River Delta Oasis

散点分布较少,说明研究区生态系统服务价值 ESV 的空间分布并非表现出完全随机性,而是表现出空间相似值之间的空间聚集,即 ESV 较高的区域趋于和 ESV 较高的区域相邻,ESV 较低的区域也趋于和 ESV 较低的相邻;1994 年第一和第三象限的点较为集中,表明在生态系统价值较高的区域和较低区域各格网间差异不大,2016 年,第一象限的点较为分散,说明在生态系统价值较高的区域各格网之间存在较大差别。

表 4 渭库绿洲生态系统服务价值(ESV)对其价值系数的敏感程度(CS)

Table 4 Sensitivity index of ESV to its Value coefficient of Ugan-kuqa River Delta Oasis

类型 Type	生态价值系数 VC Ecological value coefficient	1994 敏感性指数 CS Coefficient of Sensitive	2016 敏感性指数 CS Coefficient of Sensitive	1994—2016 敏感性指数 CS Coefficient of Sensitive
耕地 Cultivated land	VC \pm 50%	0.1785	0.3820	0.2035
草地 Grass land	VC \pm 50%	0.4664	0.5216	0.0552
水域 Water body	VC \pm 50%	0.3313	0.0821	0.2492
建设用地 Construction land	VC \pm 50%	0.0011	0.0142	0.0131
未利用地 Unused land	VC \pm 50%	0.0247	0.0285	0.0038

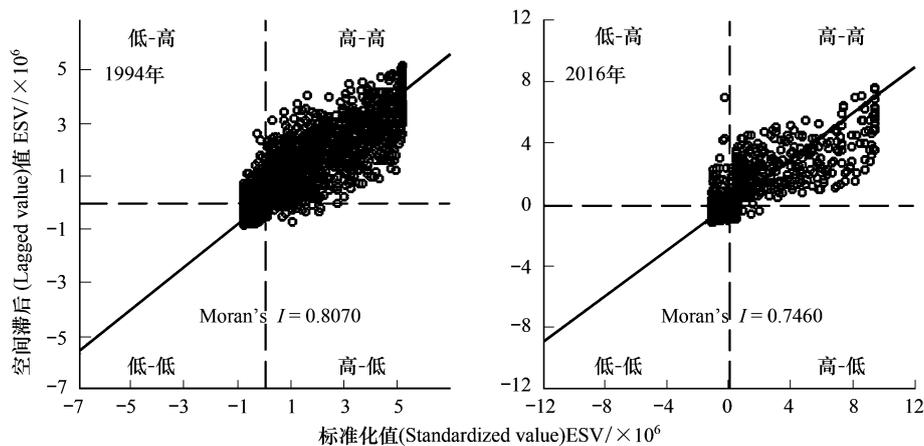


图 5 1994—2016 年渭库绿洲生态服务价值 Moran 散点图

Fig.5 Moran scatter of ecosystem services value in Ugan-kuqa River Delta Oasis during 1994—2016

HH: 高-高, High-High ; HL: 高-低, High-Low; LH: 低-高, Low-High ; LL: 低-低, Low-Low;

鉴于 Moran 散点图不能判断各区域的局部相关类型及其聚集区是否在统计意义上显著,利用 Geoda 形成聚集图 LISA (图 6)和显著性水平图(图 7),旨在更为直观的观察研究区域 ESV 的空间分布情况。观察上图可知,研究区 ESV 较高的区域和 ESV 较低的区域呈现出两极集聚,这进一步印证了 Moran 散点图所揭示的研究区 ESV 的空间相关性。研究区生态服务价值高值聚集区主要分布在渭干河上游“克孜尔水库”周围和塔里木河北岸,并呈减少趋势,低值区主要集中在绿洲南部靠近塔克拉玛干沙漠边缘和北部靠近天山中部的山区以及库车河下游荒漠区域,这类区域在空间范围上呈连片连绵趋势,空间分布格局上基本保持稳定。而低高以及高低聚集范围很小且变化不明显。

LISA 显著性水平图表示和周围单元具有显著空间联系。从检验结果来看,研究区域大部分区域相关性不显著,相关性主要存在于高高类型区以及低低类型区,这两种聚集类型的空间单元存在较强的空间正相关。在绿洲边缘、山区和河流周围等局部地区在 0.001 的显著性水平下显著,表明这些区域 ESV 与其相邻区域的 ESV 存在着很强的正空间相关性。2016 年达到显著水平($P=0.001$)的范围明显大于 1994 年的范围,这种变化主要发生在绿洲东北部及渭干河上游山区一带。

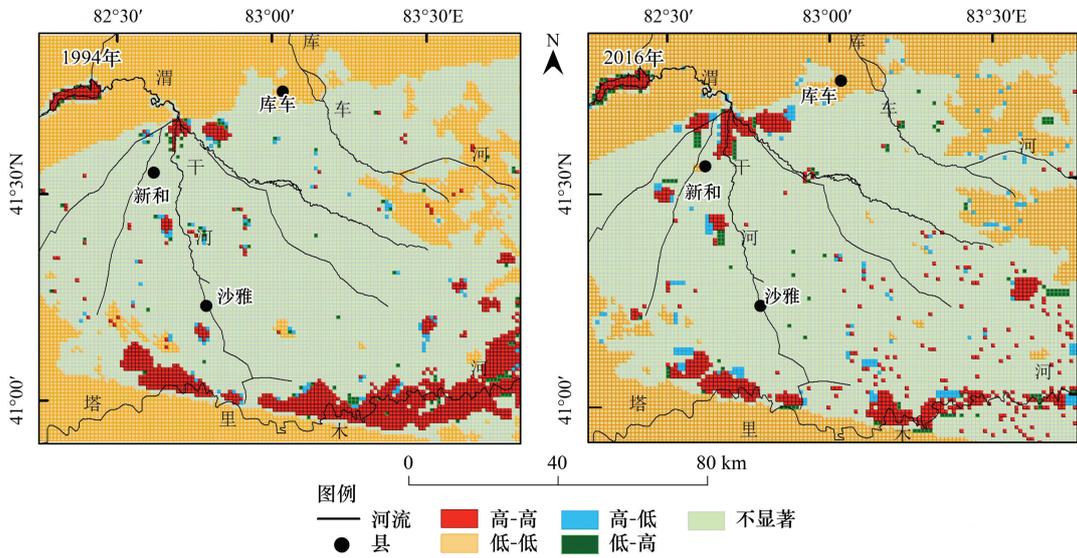


图 6 渭库绿洲生态系统服务价值 LISA 聚集图

Fig.6 The LISA cluster graph of ecosystem services value in Ugan-kuqa River Delta Oasis

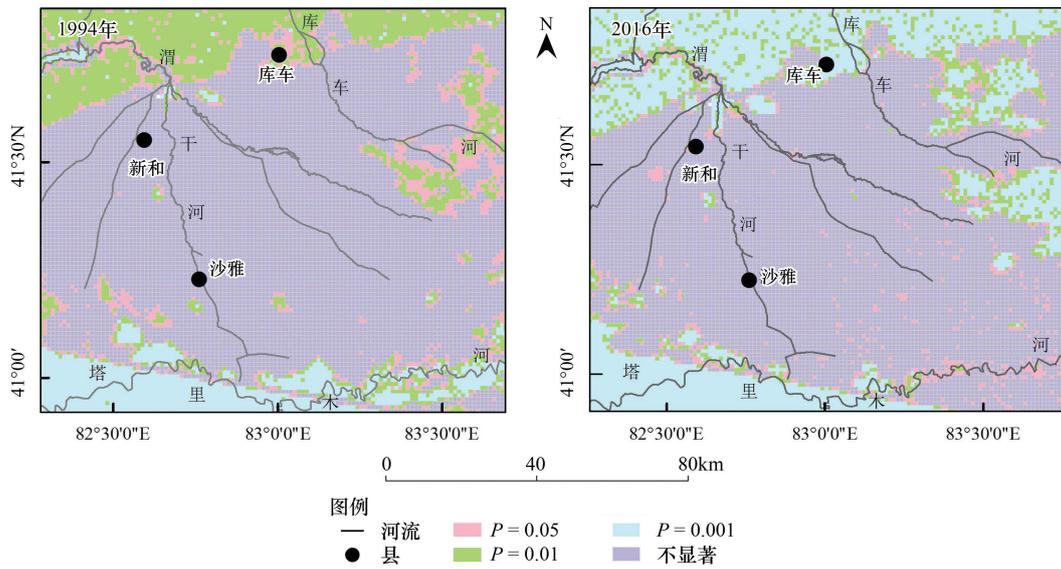


图 7 渭库绿洲生态系统服务价值 LISA 显著性水平图

Fig.7 The LISA significance level of ecosystem services value in Ugan-kuqa River Delta Oasis

3.6 驱动力分析

(1) 气候变化

影响生态服务价值变化的因子很多,既受到自然因素的制约,又受到人文因素的强烈影响,其中气温和降水作为最直接的自然因素,必然影响生态系统的变化。已有的观测资料表明(图 8),在中国西北地区气候变湿的大背景下,从 20 世纪 60 年代以来,渭库绿洲的年降水有逐年增长的趋势,渭库绿洲径流量总体上也呈上升趋势(表 5)^[34-36]。这为渭库绿洲耕地开垦提供了相对有利的气候条件,使得耕地面积快速增加,但侵占了其它土地利用类型的必需耗水,且水资源利用率并不高,仅有 52%左右^[23],导致了水域和草地等土地利用类型的减少,而给大面积的天然绿洲生态环境产生了负面影响。从以上分析可以看出,尽管耕地面积有较大幅度增加,促使研究区生态服务价值增高,但其增高幅度难以弥补其草地和水域等地类型变化所导致的生态服

务价值下降,因此总体呈下降趋势。

(2)人口数量是当前生态环境演变,尤其是环境的退化的一个主要驱动力,随着人口增长,人们对自然环境的影响程度也日益增加^[36]。

根据渭库绿洲历史时期人口变化(表 6)分析发现^[31],该绿洲人口从民国 5 年(1916)到民国 3(1948)年波动性增加趋势,而新中国成立以后绿洲的人口发展进入新的阶段。据统计,渭库绿洲总人口从 1949 年的 26.98 万增加到 2010 年的 89.2154 万,变化率为 231%,年均约增加 1.02 万人。随着人口剧增,土地压力加重,过垦现象日益突出,兴建了大量灌溉、防洪、水土保持、节水灌溉、治碱等水利基础设施,造成了水域面积不断减少,会对该区域生态系统服务价值的降低造成一定影响。同时,虽然 2004 年该绿洲城市化水平为 22.40%,虽然低于全疆平均水平(36.67%),但该区目前正处于城市化加速发展时期^[25],随着农村城镇化加快,乡镇企业兴起,非农业人口比重上升与建设用的扩大也是导致生态系统服务价值降低的原因之一。

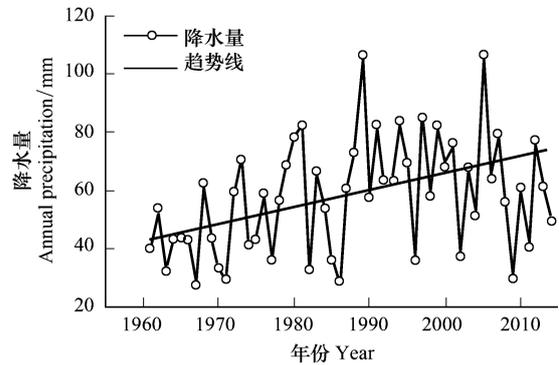


图 8 渭库绿洲年平均降水量变化

Fig.8 Annual change of precipitation in Ugan-kuqa River Delta Oasis in the period 1960—2010

表 5 渭库绿洲气候和径流量变化

Table 5 Statistics of the temperature, precipitation, evaporation, sunshine, runoff in Ugan-kuqa River Delta Oasis

年份 Year	温度 Temperature /(°C)	降水量 Precipitation /mm	蒸发量 Evaporation /mm	日照 Sunshine /h	径流量 Runoff /(10 ⁸ m ³)
1957—1960	—	—	—	—	31.48
1961—1970	10.02	43.85	2504.77	2965.75	30.56
1970—1981	10.11	58.67	2336.70	2954.54	30.66
1981—1990	10.30	79.78	2263.34	2725.86	32.06
1991—2001	10.63	71.85	2017.68	2927.50	35.85
2001—2010	—	—	—	—	37.98
平均 Average	10.89	63.54	2280.62	2893.41	33.09

总体上,受气候变化和人类活动的双重影响下,草地和水域面积的大幅度下降,耕地和建设用地的增加,导致服务价值系数较高的土地越来越少,使得研究区的生态服务价值趋于减弱。

4 讨论

本文基于遥感数据获得的土地利用数据,以空间统计分析方法结合 GIS 技术,定量分析了土地利用背景下的生态系统服务价值时空变化及其驱动因子,虽然只是

一个尝试和初步估算的宏观参考值,由于加入了空间因素,可以客观地反映了研究区生态系统服务价值在空间上的聚集规律、关联模式等分布特征,有助于揭示动态变化规律,进而探讨构建更为合理的生态系统空间格局。国内外虽然生态服务价值时空变化研究较多,但基于空间统计与分析来探索 ESV 的时空格局演变的研究尚显不足,本研究补充了这方面的缺陷。另外,由于新疆渭库绿洲是干旱区的典型缩影,对反映干旱区的山地绿洲荒漠系统具有一定的代表性,本研究方法也可为干旱区内陆河流域生态安全问题的解决提供一种

表 6 渭库绿洲历史时期人口变化(人)

Table 6 Population changes of Ugan-Kuqa River Delta Oasis in the history

年份 Year	库车 Kuqa	沙雅 Shaya	新和 Xinhe	整个绿洲 Total
1916	88464	34028	—	122492
1928	119559	43395	12853	175807
1936	181668	65195	26753	273616
1944	108862	60632	47592	217086
1948	151746	65195	49507	266448

思路。

从研究结果可以看出,尽管渭库绿洲耕地面积有一定增加,但草地和水域面积的大幅度下降,导致服务价值系数较高的土地越来越少,使得研究区生态服务价值趋于减弱。尤其是在塔里木河中游两岸这一带生态服务价值减少趋势更为明显。值得关注的是,塔里木河两岸的胡杨林、天然草地和草本植物是渭库绿洲的天然屏障,它阻挡着塔克拉玛干沙漠的侵移,维护着绿洲的生态安全,其生态作用是十分巨大,在当地的国民经济发展中具有极其重要的作用,一旦被破坏,将较难重建起原有的生态体系。在今后的发展中应加强草地和水域等资源的保护和管理,需要进一步明确耕地资源和生态环境质量底线,切实做到人口、土地资源及生态环境协调持续发展。

研究区生态服务价值减少趋势与新疆其他一些典型区域生态服务价值变化趋势有相似性,也有差异性。如叶尔羌河流域生态服务价值总量呈减少趋势,且减少的速率加快^[32];焉耆盆地的生态服务价值在波动性增加趋势^[33];阿克苏河流域生态系统服务价值整体变化较小,总价值先减后增趋势^[16];这些区域虽然都地处塔里木盆地周边地区,但是生态服务价值变化趋势有一定差异。另外,对于北疆来说,也有类似的情况。如玛纳斯县生态系统服务价值总体减少趋势^[41];艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值整体变化不大,但近年ESV有所降低^[42];天山北坡生态系统服务价值基本稳定^[43]。造成这种生态服务价值变化地域差异性的原因是生态服务价值的尺度依赖型^[44],生态价值服务评估方法,驱动力等方面的不同,其价值评估结果也存在较大差异^[42]。上述研究成果对于干旱区生态系统服务在价值评估方面积累了重要的理论和实践经验。

近年来一些学者对于渭库绿洲生态服务价值的评估结果也存在一定的差异性,主要原因一是对不同系统生态服务价值单价的计算方法不同。在生态服务价值计算中产量因子和当量因子选取应尽量精确,否则将忽略不同区域差异。如对于生态价值系数来说,张飞^[45]、王雪梅^[27]等学者直接采用谢高地等的研究成果,此方法是一种全国的平均状态,将它分别运用于不同区域时,忽略了不同区域差异;还有学者将流域划分为上、中、下游,在谢高地等的研究成果基础上,结合当地粮食产量和粮食平均收购价格^[28],对生态服务价值当量因子进行了修订来评价生态服务价值,乔旭宁^[46]等通过调查当地居民的支付意愿来反映该区域的生态系统服务价值,因此最终生态服务价值计算结果存在差异。

二是研究所采用的遥感数据、生态系统分类、信息提取方法等不同。如,杨永菊等^[47]以 Landsat 和 Quick Bird 等遥感数据为基本数据源,将该流域土地利用类型划分为林地、草地、耕地、沼泽、水域、未利用地和建设用地 7 个类别,比本研究增加了林地和沼泽等生态系统类型;与不同于本研究所使用的数据,乔旭宁^[29]等主要利用农业、经济社会、水资源利用等方面的统计数据,分析了本流域农田生态服务价值变化。因此,这些也会对生态系统服务价值总量计算带来一定的偏差和不确定性,但仍然丰富了生态服务价值评估方法在干旱典型绿洲的应用,为本绿洲生态补偿标准的制订提供科学依据。

本研究的研究方法也存在一些不足之处。虽然本研究根据渭库绿洲的实际情况对谢高地等生态服务价值当量因子进行了修订来评价生态服务价值,此方法具可操作性、直观性和突出研究区特点被广泛接受和认可,但是这种方法估算的结果仍较粗糙,需结合当地人们的支付意愿和支付能力来修订或者建立一个针对渭库绿洲生态系统服务价值的指标体系以及相应的价值系数,才能使结果更加符合实际,后期研究将对此方法做进一步改进。同时,需加强不同数据源对比和尺度衔接研究^[44]。

此外,本文主要侧重研究区生态系统服务价值分布格局的空间展示,受限于资料方面的局限,关于生态服务价值变化驱动力及其驱动机制不够深入研究。其实生态系统服务价值变化受自然因素的制约,又受社会、经济、技术、政治等人文因素的共同作用的结果^[36]。

今后,如何将诸多因子综合考虑,更多利用主成分分析、多元回归分析、相关性分析、灰色系统分析法等数理统计方法,进一步量化气候变化和人类活动对生态系统服务价值的影响,有待开展进一步深入的研究。

5 结论

(1) 渭库绿洲土地利用/覆被方式以耕地和草地为主;土地利用变化显著,1994—2016 年,土地利用类型

呈现两增三减趋势,其中耕地、建设用地面积增加,而草地、水域和未利用地的面积减少,耕地和草地面积变化最为剧烈,分别为 169837.74hm^2 , -71988.05hm^2 。

(2) 1994—2016 年渭库绿洲的生态系统服务总价值呈减少趋势,由 4895.67×10^6 元减少到 3864.78×10^6 元,减少了 1030.89×10^6 元,年均减少 0.96%;尽管耕地面积有较大幅度增加,促使研究区生态服务价值增高,但其增高幅度难以弥补其草地和水域等地类型变化所导致的生态服务价值下降,因此总体呈下降趋势。空间上表现生态系统服务价值量减少的区域比增加的区域多,增值区及减值区呈包围态势,生态系统服务高值区域在不断缩小,且塔里木河北岸地区生态服务价值减少量相对较多,要注重生态保护和生态恢复建设;同时生态系统单项服务价值出现有增有减的趋势,废物处理、水源涵养、生物多样性保护、娱乐文化等四项单项服务价值出现下降趋势,而食物生产、气候调节、气体调节和原材料、土壤形成与保护等其他五项单项服务价值出现上升趋势。

(3) 敏感性分析表明,研究区生态服务价值系数的敏感性指数都小于 1,说明研究区 ESV 对于 VC 是缺乏弹性的,价值系数适用于渭库绿洲,研究结果可信。

(4) 研究区生态系统服务价值表现出明显的空间自相关与空间聚集现象,生态服务价值高值聚集区主要分布在渭干河上游“克孜尔水库”周围和塔里木河北岸,并且减少趋势,注意保护高值区的空间稳定性;低值聚集区主要集中在绿洲南部靠近塔克拉玛干沙漠边缘和北部靠近天山中部的山区以及库车河下游荒漠区域,这类区域在空间范围上呈连片连绵趋势,空间分布格局上基本保持稳定。

(5) 受气候变化和人类活动的双重影响下,草地和水域面积的大幅度下降,耕地和建设用地面积的增加,导致服务价值系数较高的土地越来越少,使得研究区到生态服务价值趋于减弱。

参考文献 (References):

- [1] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.
- [2] 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.
- [3] 李明, 吕芳, 吴怡璇. 城市边缘区土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究——以大连市甘井子区为例. 中国农业资源与区划, 2015, 36(5): 36-42.
- [4] 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.
- [5] Daily G C. *Nature's Services; Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington D C: Island Press, 1997.
- [6] Simpson R D. A note on the Valuation of Ecosystem Services in Production. Discussion Paper 01-16, 2001: 1-16.
- [7] Holmes T P, Bergstrom J C, Huszar E, Kask S B, Orr III F. Contingent valuation, net marginal benefits, and the scale of riparian ecosystem restoration. *Ecological Economics*, 2004, 49(1): 19-30.
- [8] Swift M J, Izac A M N, van Noordwijk M. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes-are we asking the right questions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(1): 113-134.
- [9] Yue T X, Liu J Y, Li Z Q, Chen S Q, Ma S N, Tian Y Z, Ge F. Considerable effects of diversity indices and spatial scales on conclusions relating to ecological diversity. *Ecological Modelling*, 2005, 188(2/4): 418-431.
- [10] Dale V H, Polasky S. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 286-296.
- [11] 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.
- [12] 石珪, 王如松, 黄锦楼, 阳文锐. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析. 科学通报, 2012, 57(9): 720-731.
- [13] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 自然资源学报, 2004, 19(4): 480-491.
- [14] 程敏, 张丽云, 崔丽娟, 欧阳志云. 滨海湿地生态系统服务及其价值评估研究进展. 生态学报, 2016, 36(23): 7509-7518.
- [15] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [16] 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.
- [17] 杨志新, 郑大玮, 文化. 北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究. 自然资源学报, 2005, 20(4): 564-571.
- [18] 王宗明, 张柏, 宋开山, 刘殿伟, 张树清, 李方, 国志兴. 松嫩平原土地利用变化对区域生态系统服务价值的影响研究. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(1): 149-154.
- [19] 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.
- [20] 林栋, 马晖玲, 任正超, 李元恒. 基于 LUC 的兰州城市生态系统服务价值动态分析. 生态科学, 2016, 35(2): 134-142.
- [21] 买买提·沙吾提, 吐尔逊·艾山, 塔西甫拉提·特依拜, 如则麦提·米吉提, 麦尔耶姆·亚森, 依力亚斯江·努尔麦提. 基于热红外光谱的干旱区土壤盐分监测研究. 干旱区地理, 2017, 40(1): 181-187.
- [22] 满苏尔·沙比提, 阿布拉江·苏莱曼. 渭干河-库车河三角洲绿洲农业气象灾害及减灾对策分析. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 90-95.
- [23] 满苏尔·沙比提, 海鹰, 帕尔哈提·艾孜木. 渭干河-库车河三角洲绿洲 50 a 来农业开发及所引发的生态问题探析. 中国沙漠, 2004, 24(3): 349-354.
- [24] 王娟, 张飞, 于海洋, 任岩, 张月. 基于 LUC 的渭干河—库车河三角洲绿洲水文及生态特征. 水土保持研究, 2016, 23(2): 236-242.
- [25] 满苏尔·沙比提, 楚新正. 新疆渭干河—库车河三角洲绿洲土地利用时空变化特征分析. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 12-18.
- [26] 孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 丁建丽, 买买提·沙吾提, 韩桂红, 桂东伟. 渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究. 生态学报, 2012, 32(10): 3252-3265.
- [27] 王雪梅, 柴仲平, 塔西甫拉提·特依拜, 龚爱谨, 胡江玲. 渭干河-库车河三角洲绿洲景观格局动态变化及其对生态系统服务功能的影响. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 10-15.
- [28] 黄凤, 乔旭宁, 唐宏. 近 20 年渭干河流域土地利用与生态系统服务价值时空变化. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 214-224.
- [29] 乔旭宁, 顾羊羊, 唐宏, 杨永菊. 渭干河流域农田生态系统服务价值变化及其影响因素分析. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 237-245.
- [30] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576.
- [31] 满苏尔·沙比提, 阿里木江·卡斯木, 帕尔哈提·艾孜木. 渭干河-库车河三角洲绿洲人口动态变化及其带来的问题. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 71-76.
- [32] 张广朋, 徐海量, 杜清, 张沛. 近 20a 叶尔羌河流域生态服务价值对土地利用/覆被变化的响应. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1303-1310.
- [33] 哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 麦麦提吐尔逊·艾则孜. 焉耆盆地气候变化和人类活动对生态系统服务价值的影响研究. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 684-694.
- [34] 黄青, 孙洪波, 王让会, 张慧芝. 干旱区典型山地-绿洲-荒漠系统中绿洲土地利用/覆盖变化对生态系统服务价值的影响. 中国沙漠, 2007, 27(1): 76-81.
- [35] 李保杰. 矿区土地景观格局演变及其生态效应研究——以徐州市贾汪矿区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [36] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990-2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [37] 王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2004, 19(1): 55-61.
- [38] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, Lacey R E. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. Ecological Economics, 2001, 39(3): 333-346.
- [39] 伍星, 沈珍瑶, 刘瑞民, 宫永伟. 土地利用变化对长江上游生态系统服务价值的影响. 农业工程学报, 2009, 25(8): 236-241.
- [40] 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.
- [41] 崇洁, 李波, 洪睿, 张新时. 玛纳斯县生态系统服务价值的动态评估. 干旱区地理, 2008, 31(3): 477-484.
- [42] 李哲, 张飞, Kung H T, 张月, 井云清. 1998-2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异. 生态学报, 2017, 37(15): 4984-4997.
- [43] 吴建寨, 李波, 张新时, 夏艳玲, 崇洁. 天山北坡土地利用/覆被及生态系统服务功能变化. 干旱区地理, 2007, 30(5): 728-735.
- [44] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [45] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 田源. 塔里木盆地北缘绿洲土地利用与生态系统服务价值的时空变化研究——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例. 中国沙漠, 2009, 29(5): 933-941.
- [46] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚. 渭干河流域生态系统服务的支付意愿及影响因素分析. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1254-1261.
- [47] 杨永菊, 乔旭宁, 唐宏, 乔旭明, 聂小军, 王锐. 渭干河流域土地利用程度与生态系统服务价值的关系. 湖北农业科学, 2014, 53(2): 277-283.