

# 天山北坡城市群土地利用及生态服务价值时空演变

刘亚茹, 李莉, 菊春燕

(新疆农业大学 管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** [目的] 研究天山北坡城市群土地利用及生态服务价值(ESV)的时空演变特征,为该区生态服务功能改善和生态景观建设提供理论指导。[方法] 基于2000,2010,2018年天山北坡城市群的土地利用数据,利用遥感、空间统计分析方法,分析天山北坡城市群土地利用动态变化和生态服务价值的时空演变特征,并采用景观指数模型研究了天山北坡城市群ESV的景观格局变化。[结果] ①天山北坡城市群主要用地类型为未利用地和草地,建设用地的单一动态变化最大,动态变化幅度达2.7%;土地利用转移变化主要发生在耕地、草地、建设用地、未利用地之间,以草地向耕地和建设用地转入最为突出。②近20a研究区ESV总量从1410.76亿元减少到1400.17亿元,共计损失10.59亿元,整体呈下降趋势;其中支持服务的ESV减少最多。③研究区ESV呈现出西北部和中部高,北部和东南部低的空间格局;2000—2018年研究区ESV景观格局发生显著的变化,低、中、高ESV区的景观格局表现为研究前期破碎异质化,后期集聚同质化。[结论] 针对不同等级的ESV区,天山北坡城市群的生态环境恶化,需要采取不同的措施改善其生态服务价值,降低城市群发展对生态环境造成的破坏,推动区域生态景观的建设。

**关键词:** 天山北坡城市群; 土地利用; 生态服务价值; 空间演变; 景观指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0312-09

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 刘亚茹, 李莉, 菊春燕. 天山北坡城市群土地利用及生态服务价值时空演变[J]. 水土保持通报, 2020,40(6):312-320. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.044; Liu Yaru, Li Li, Jü Chunyan. Spatio-temporal evolution of land use and ecological service value in urban agglomeration on northern slope of Tianshan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(6):312-320.

## Spatio-temporal Evolution of Land Use and Ecological Service Value in Urban Agglomeration on Northern Slope of Tianshan Mountains

Liu Yaru, Li Li, Jü Chunyan

(School of Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial evolution characteristics of land use and ecological service value (ESV) in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains were studied in order to provide theoretical guidance for the improvement of ecological service functions and the construction of ecological landscape in this area. [Methods] Based on the land use data of the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains in 2000, 2010, and 2018, the characteristics of the land use dynamics and the ecological service value of the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains were analyzed using remote sensing and spatial statistical analysis methods. The landscape index model was used to explore the landscape pattern changes of the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountain. [Results] ① The main types of land used in the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains were unused land and grassland. The dynamic change of land use for construction land was the largest. The land use transfer mainly occurred from grassland to cultivated land, cultivated land and unused land. And the transfer from grass land to cultivated land and construction land was the most

收稿日期: 2020-07-31

修回日期: 2020-08-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“干旱区城市化绿色空间时空格局演变规律及驱动机制研究:以新疆乌鲁木齐市圈为例”(41901333)

第一作者: 刘亚茹(1995—),女(汉族),新疆维吾尔自治区石河子市人,硕士研究生,研究方向为土地利用与土地生态。Email: liuyaru301@163.com。

通讯作者: 李莉(1975—),女(汉族),重庆市人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事资源经济与管理、环境公共政策分析方面的研究。Email: 466347947@qq.com。

prominent. ② The total amount of ESV in the study area in the past 20 years decreased from 141.176 billion yuan to 140.017 billion yuan, with a total loss of 1.059 billion yuan. The overall trend was declining, and grassland had the most ESV loss. ③ The ESV of the study area presented a spatial pattern of high in the northwest and middle, and low in the north and southeast. the ESV landscape pattern of the study area changed significantly from 2000 to 2018, and the landscape pattern of the low, medium and high ESV density areas was characterized by fragmentation and heterogeneity in the early stage of the study, and the homogeneity of agglomeration in the later stage. [Conclusion] The ecological environment of the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains is deteriorating. For different grades of ESV areas, different measures need to be taken to improve the ecological service value of the study area, reduce the damage to the ecological environment caused by the development of the urban agglomeration, and promote the construction of ecological landscape.

**Keywords:** urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains; land use; ecological service value; spatial evolution; landscape index

土地利用/覆盖变化是影响全球环境变化的重要因素之一,作为联系枢纽连接着人类社会经济活动和自然物质生态循环的过程<sup>[1-2]</sup>。土地利用变化对生态服务价值的影响一直是生态服务价值研究的方面之一<sup>[3]</sup>,因为土地利用的变化直接影响着生态系统结构和功能,进而使生态服务价值发生改变<sup>[4]</sup>。生态系统服务价值是指(ecosystem services value, ESV)对生态系统提供商品和资源环境进行经济价值评估的表现形式<sup>[5]</sup>,对于 ESV 的测算能够为区域生态环境的保护、生态系统管理、生态规划以及生态资产转换相关政策等方面提供重要的基础和依据<sup>[6]</sup>。近些年来,ESV 受到国内外众多生态环境学者的关注,1997 年 Costanza 等<sup>[7]</sup>基于土地利用开展了生态服务价值的研究,促进了生态系统结构和功能的发展。我国学者谢高地等<sup>[8]</sup>结合我国的区域生态状况,修订和改进了一套适用于我国的生态服务功能当量因子测算法。根据此方法,我国先后分别从流域<sup>[9]</sup>、城市群<sup>[10]</sup>、省市<sup>[11-12]</sup>、县域<sup>[13]</sup>等多个尺度展开对 ESV 的研究。研究内容分为两方面,一方面是对单向 ESV<sup>[14]</sup>和单一生态系统的评估<sup>[15]</sup>,另一方面趋向于土地利用变化、景观格局变化对 ESV 影响的研究<sup>[16]</sup>。整体上来看,静态评估的研究成果较多,未充分综合考虑研究区 ESV 在时间和空间变化的特征,导致难以体现 ESV 空间的差异性<sup>[17]</sup>。2017 年,天山北坡城市群被正式列为国家重点建设的 19 个城市群之一,在稳疆兴疆,推进兵地融合和区域经济发展中发挥着关键性的作用<sup>[18]</sup>。近些年来,伴随着城镇化的推进和经济的快速发展,天山北坡城市群土地利用结构产生了一定程度的变化;人类活动的影响使土地生态环境问题变得岌岌可危,但是关于西北绿洲城市群土地生态服务价值的研究并不多,使得此区域在生态安全和可持续发

展方面缺乏相关的依据。鉴于此,本文采用研究区 2000,2010,2018 年的 LUCC 数据,针对天山北坡城市群土地利用和生态服务价值的时空变化进行了定量分析和描述;为了更直观地体现出 ESV 在不同等级下人类活动的强弱,利用生态景观学知识,探索了研究区近 20 a 的 ESV 的景观格局变化。本研究可为天山北坡城市群的生态服务功能的改善和生态景观的建设提供相关的理论指导。

## 1 研究区概况

天山北坡城市群位于东经 84°33′—90°32′,北纬 42°78′—45°59′,北接古尔班通古特沙漠,南连天山山脉,资源禀赋优越,地理条件良好,是“一带一路”建设发展的重要驿站之一。年均气温和降水量分别约为 7.5 °C,185.34 mm,属于山地—绿洲—荒漠地带。高山冰雪融水为区域发展提供了水源,草地是主要的绿地覆被类型。天山北坡城市群范围较广,涵盖乌鲁木齐市、昌吉州六县一市、伊犁州奎屯市,塔城地区乌苏市和沙湾县以及吐鲁番地区的两县一区<sup>[19]</sup>。2018 年底,研究区的总人口达到 591.71 万人,占新疆的总人口的 25.09%;国民生产总值达 6 566.45 亿元,占新疆 53.8%;第一、二、三产业的产值分别为 484,2 822,3 260 亿元;在新疆经济、科技、文化发展中占据着举足轻重的地位。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 数据来源

本文采用基础数据包括:土地利用/覆被数据、粮食产量和价格数据、社会经济数据,具体时间、数据来源、用途详见表 1。选取 2000,2010,2018 年为时间节点。

表 1 数据类型及来源

数据类型	年份	数据来源	用途
LUCC 数据	2000,2010,2018	中国科学院资源环境科学数据中心	模型运用
行政分区图	2018	国家地球系统科学数据共享平台	行政分区
粮食价格和产量数据	2000,2010,2018	《中国农村统计年鉴》《新疆统计年鉴》	计算平均粮食产量、计算价值当量

## 2.2 土地利用动态度

土地利用动态度是指土地利用变化的速率<sup>[20]</sup>。因此采用单一动态度研究天山北坡城市群的土地利用情况。

单一动态度计算公式为：

$$R_s = \frac{K_b - K_a}{K_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $K_a$  为研究区某种土地类型开始年份  $a$  的面积； $K_b$  是该土地类型终止年份  $b$  的面积； $T$  是研究时间；是研究  $T$  时间段内单一土地利用动态度。

## 2.3 生态系统服务价值测算

2.3.1 当量因子生态系统服务价值的修正 参考谢高地等人<sup>[21]</sup>关于 ESV 当量因子的研究,确定一个单位面积当量因子的经济价格是全国平均粮食单产市场价格的 1/7。2000—2018 年,天山北坡城市群的平均粮食产量为 6 922.02 kg/hm<sup>2</sup>,同期新疆平均粮食产量为 6 441.05 kg/hm<sup>2</sup>,参照许丽敏等人<sup>[22]</sup>的研究以二者的比值进行修正(系数为 1.07),结合 2005 年谢高地等<sup>[23]</sup>制定生态系统生物量因子(系数为 0.58),最终确定研究区当量因子修正系数为 0.62,2018 年研究区的平均粮食价格为 2.12 元/kg(取自

2018 年研究区小麦和玉米价格的均值)。最后,参考刘川等人<sup>[24]</sup>的研究考虑到居民对生态系统的支付意愿和能力,所以引入社会经济发展系数对研究区的生态服务价值进行修正,根据公式的计算得到天山北坡城市群修正过后一个当量因子的经济价值为 1 189.09 元/(hm<sup>2</sup>·a)。社会经济发展系数计算公式为：

$$B = \frac{BM_c}{BM_x} \times \frac{gdp_x}{GDP_c} \quad (2)$$

式中： $B$  为社会经济发展系数； $BM_c$  代表天山北坡城市群的恩格尔系数； $BM_x$  代表全国的恩格尔系数； $gdp$  代表天山北坡城市群的人均国内生产总值； $GDP$  代表全国人均国内生产总值。

2.3.2 生态服务价值评估模型的构建 根据修正后的一个当量因子的经济价值,构建研究区的生态服务价值评估模型,计算公式为：

$$ESV = \sum A_u \cdot VC_u \quad (3)$$

$$ESV_k = \sum A_u \cdot VC_{uk} \quad (4)$$

式中： $ESV$ ,  $ESV_k$  分别代表 ESV 总量(元)、第  $k$  项 ESV； $A_u$  为第指  $u$  类土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>)； $VC_u$  为  $u$  类土地类型的面积； $VC_{uk}$  为第  $u$  类土地类型的第  $k$  项 ESV。结果详见表 2。

表 2 天山北坡城市群各土地类型单位面积 ESV 系数估算结果

元/hm<sup>2</sup>

一级类型	二级类型	农田	森林	草地	河流	荒漠
供给服务	食物生产	1 189.09	392.40	511.31	529.15	23.78
	原材料生产	463.75	3 543.49	428.07	350.78	47.56
调节服务	气体调节	856.15	5 136.87	1 783.64	1 736.07	71.35
	气候调节	1 153.42	4 839.60	1 854.98	9 280.85	154.58
	水文调节	915.60	4 863.38	1 807.42	19 150.31	83.24
支持服务	废物处理	1 652.84	2 045.24	1 569.60	17 390.45	309.16
	保持土壤	1 747.96	4 780.14	2 663.56	1 426.91	202.15
文化服务	维持生物多样性	1 212.87	5 362.80	2 223.60	4 233.16	475.64
	提供美学景观	202.15	2 473.31	1 034.51	5 428.20	285.38
总计		9 393.82	33 437.23	13 876.69	59 525.88	1 652.84

注:研究区耕地—农田,林地—森林、草地—草地、水域—河流、未利用地—荒漠,研究区建设用地的 ESV 暂未考虑,将其值设置为 0。

## 2.4 敏感性分析

本研究运用敏感性指数来揭示研究区生态服务价值随时间的变化对价值系数的依赖程度,同时也为了检测所选用和修正的价值系数是否适用于干旱区绿洲城市群的研究。若  $CS > 1$ ,则表明 ESV 对 VC 富

有弹性,结果可信度低;若  $CS < 1$ ,则表明 ESV 对 VC 缺乏弹性,结果可信。计算公式为:

$$CS = \left| \frac{(ESV_b - ESV_a) / ESV_a}{(VC_{if} - VC_{jf}) / VC_{if}} \right| \quad (5)$$

式中： $CS$  为指敏感性系数； $VC_{if}$ ,  $VC_{jf}$  为  $i$  种土地用

类型的价值系数;  $ESV_a, ESV_b$  为调整前后的生态服务价值量。

### 2.5 景观指数模型

景观指数是高度浓缩景观格局信息的简单定量指标,反映景观结构特征和空间格局的变化<sup>[25]</sup>。本文运用景观指数来定量化体现天山北坡城市群 ESV 低、中、高区的景观格局演变特征。

参照前人研究,结合研究区域的具体特征和研究的实际需要,从斑块类型水平上选取 6 项指标分别为斑块面积(CA),斑块数量(NP)、景观形状指数(LSI)、最大斑块指数(LPI)、斑块分散度(SPLIT)、集聚度(AI)。通过这 6 项指标来探究城市群 ESV 的景观格局变化。具体景观指数的计算方法和意义详见表 3。

表 3 景观指数的算法与生态意义

指数	计算方法	生态意义
CA	$CA = \sum_{j=1}^n a_{ij}$	斑块类型的面积,CA 越大,表示此斑块类型在分组中的优势度越大。
NP	$NP = n$	NP 的大小和景观破碎度呈正相关,NP 越大,景观破碎度化越严重,NP 越小,景观破碎化越轻。
LSI	$LSI = \frac{0.25D}{\sqrt{A_i}}$	表示景观的复杂程度,LSI<1,表明景观形状越简单,LSI 越大,表明景观形状越复杂。
LPI	$LPI = \frac{\max x_{ij}}{a}$	确定景观中的优势景观,其值得大小和变化可以代表人类的活动强度。
SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{a_{ij}^2}$	指人类对景观的干扰程度,一般来说分散度越大,人类对生态系统的破坏度就越严重。
AI	$AI = \frac{a_{ij}}{\max a_{ij}}$	指某种景观类型的斑块的集聚度,AI 越大,表明斑块越聚集,AI 越小,表明斑块越分散。

注: $i=1, \dots, m$  是斑块种类; $j=1, \dots, n$  是斑块量; $m$  为所有的斑块类型; $n$  为某一类斑块类型的斑块量; $A_i$  为第  $i$  类景观类型的面积; $D$  为所有斑块边界的长度; $A$  为总景观面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 天山北坡城市群土地利用变化分析

将研究区的 25 个二级地类,运用 ArcGIS 软件重分类为 6 个一级地类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地。由表 4 可以看出,2000—2018 年天山北坡城市群的未利用地分布最广,占总面积的比重达到 53.90%~54.60%;草地是占比为第二位的土地利用类型,所占比例为 30.47%~32.00%。耕地面积占比从 2000 年的 10.03% 上升到 2018 年的 11.62%,建设用地、林地、水域用地的比重较小,研究期间 3 者面积约占研究区总面积的 3.36%~4.00%。

利用公式(1)计算研究区 2000—2018 年的土地利用动态度(表 4)。由表 4 可得,从单一土地利用动

态度来看,研究期间天山北坡城市群土地利用类型面积呈“3 增 3 减”的状态发展,即耕地、建设用地、水域的单一动态度呈正向发展,而林地、草地、未利用地单一动态度与之相反。2000—2018 年耕地和建设用地动态较为活跃,二者面积分别增加了 3 084.46 km<sup>2</sup>, 1 073.77 km<sup>2</sup>,这两种土地类型面积的增多和研究区人口的增多以及城镇化的发展有密切的关系;水域面积增加 89.96 km<sup>2</sup>,因为各个城市的发展建设需要修建人工湖和水库,所以水域会出现一定程度的增加。研究区草地开垦和破坏力度的加大,使其持续大量减少,近 20 a 来草地面积共计减少 3 008.07 km<sup>2</sup>;与此同时,未利用地面积减少 1 203.57 km<sup>2</sup>;林地面积呈现持续下降的趋势,因林地所占面积较少,所以变化并不明显。

表 4 天山北坡城市群土地利用变化及单一动态度

年份	项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	面积/km <sup>2</sup>	19 461.75	2 626.88	62 108.46	1 734.16	2 155.67	105 910.32
2010	面积/km <sup>2</sup>	21 356.37	2 593.40	60 917.79	1 776.78	2 304.64	105 048.26
2018	面积/km <sup>2</sup>	22 546.21	2 590.33	59 100.39	1 824.12	3 229.44	104 706.75
2000—2010	动态度/%	0.97	-0.13	-0.20	0.25	0.69	-0.08
2010—2018	动态度/%	0.70	-0.01	-0.38	0.33	5.02	-0.04
2000—2018	动态度/%	0.88	-0.08	-0.27	0.29	2.77	-0.06

为了更清楚地来展示天山北坡城市群的土地利用的时空转移变化,研究利用转移矩阵来表示不同时

期土地类型的相互转移变化情况(表 5—6)。研究期间,草地、耕地、未利用地、建设用地这 4 类用地类型

转移变化较为显著,林地和水域转移变化幅度较小。2000—2010年,研究区草地和未利用地面积向耕地共转入 1992.25 km<sup>2</sup>;原因是西部大开发政策实施以来,随着城市群城镇化速率的加快,人口的增多,对粮食的需求的越来越迫切,毁草开田项目相应增多,导致耕地面积扩张;2010—2018年,耕地和未利用地共向草地共转移 630.6 km<sup>2</sup>;其中耕地向草地转移比前 10 a 更为显著,因为 2010年后国家提出生态文明建设,随着天山北坡城市群“三北防护林”工程的推进,

退耕还草还林政策的实施,使得耕地向草地转移明显。

社会经济的快速发展促进公共设施用地、工矿用地、城乡居民点的兴建,需开发未利用地和侵占大量的耕草地来满足建设用地的需要,因而 2010—2018年未利用地、草地、耕地向建设用地共转移 988.77 km<sup>2</sup>,是前 10 a 转移量的 7.12 倍;研究时间段内水域和林地与其他地类相互转移虽不太明显,但仍有少量的草地向水域和林地转移。

表 5 天山北坡城市群 2000—2010 年土地利用转移变化矩阵

km<sup>2</sup>

土地类型	2010 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年 耕地	19 319.49	0.05	86.24	3.08	49.71	3.17
林地	34.86	2 582.27	5.93	1.89	0.95	0.98
草地	1 274.57	8.93	60 652.06	83.82	42.22	46.85
水域	8.44	0.00	33.24	1 664.85	10.84	16.80
建设用地	1.33	0.01	0.22	0.02	2 154.02	0.06
未利用地	717.68	2.14	140.09	23.13	46.90	104 980.38

表 6 天山北坡城市群 2010—2018 年土地利用转移变化矩阵

km<sup>2</sup>

土地类型	2018 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010 年 耕地	20 477.74	2.68	487.09	14.41	348.04	26.40
林地	8.43	2 429.02	151.61	0.81	0.84	2.60
草地	1 871.49	155.24	58 261.63	85.26	400.93	142.41
水域	20.17	0.64	46.97	1 655.88	6.19	46.66
建设用地	49.75	0.32	9.58	8.47	2 230.64	5.88
未利用地	118.62	2.42	143.51	59.29	239.80	104 482.93

### 3.2 天山北坡城市群生态服务价值时空变化分析

3.2.1 生态服务价值时间变化分析 根据单位面积 ESV 系数表(表 2),计算得到 2000,2010,2018 年天山北坡城市群单项生态服务价值(表 7)。2000—2018 年,天山北坡城市群的 ESV 的总量分别为 1 410.76,1 412.03,1 400.17 亿元,整体减少 10.59 亿元。近 20 a 来,调节服务、支持服务、文化服务、供给服务的占比平均值由大到小分别为 50.86%,33.18%,8.03%,7.92%。总体来看,除供给服务 ESV 呈上升趋势外,其他 3 类一级生态服务功能均减弱。调节服务主要由 4 类二级生态服务功能类型构成,2000—2018 年气体、气候、水文调节和废物处理的平均 ESV 分别为 150.33,182.34,184.54,198.97 亿元;整个研究期,气体调节和气候调节服务功能呈下降趋势,二者价值共损失 4.38 亿元,这两种调节功能的变化和研究区的草地变化密切相关。天山北坡城市群的草地面积较大,变化也较为明显,调节服务 ESV 的变化和草地变化趋势一致;水文

调节 ESV 呈现出先增加后减少又增加的发展态势,近 20 a 间废物处理 ESV 功能共增加 1.50 亿元,该功能和水域面积的变化情况相似。各类调节服务 ESV 由小到大排序为:气体调节<气候调节<水文调节<废物处理。支持服务中保持土壤和生物多样性 ESV 功能持续减弱,二者近 20 a ESV 减少量分别为 2.9,3.33 亿元,这 2 种支持服务 ESV 的减少与草地面积下降有关,除此之外还受到林地和裸地变化的影响。

天山北坡城市群 20 a 来食物生产功能共计增加 2.14 亿元,食物生产服务功能受耕地的影响较大,研究期间耕地面积不断地扩张,食物生产 ESV 的变化和耕地动态变化具有一致性;原材料生态服务功能波动较小,基本维持原状。文化服务功能的变化受林地和草地的影响较大,研究期间娱乐文化 ESV 从 2000 年 114.32 亿元下降到 2018 年的 111.89 亿元,共计损失 2.43 亿元;且平均 ESV 为 113.19 亿元,仅占总 ESV 的 8.03%。

表 7 天山北坡城市群单项 ESV 估算表

10<sup>8</sup> 元

生态服务价值类型		各项生态服务价值变化			单向生态服务价值变化量
一级类型	二级类型	2000 年	2010 年	2018 年	2000—2018 年
供给服务	食物生产	59.36	61.00	61.50	2.14
	原材料生产	50.57	50.79	50.60	0.03
调节服务	气体调节	151.50	150.84	148.66	-2.84
	气候调节	182.83	182.91	181.29	-1.54
	水文调节	184.87	185.04	183.71	-1.16
	废物处理	197.92	199.59	199.42	1.50
支持服务	保持土壤	235.88	235.75	232.98	-2.90
	维持生物多样性	233.51	232.75	230.18	-3.33
文化服务	娱乐文化	114.32	113.37	111.89	-2.43
总计		1 410.76	1 412.03	1 400.17	-10.59

3.2.2 生态服务价值空间分异 为了对比天山北坡城市群 ESV 的空间差异性,基于 ArcGIS 10.5 空间分析功能构建渔网图,利用渔网图和研究区的土地类型进行叠加运算,计算得出每个格网的 ESV。通过 ESV 的值对研究区的 ESV 进行分区,制作出 3 期天山北坡城市群 ESV 空间分区分异图。2000,2010,2018 年的 ESV 分区均以  $0(\text{元}/\text{hm}^2) \leq \text{ESV} < 6\ 000$  ( $\text{元}/\text{hm}^2$ ) 为低 ESV 区、 $6\ 000(\text{元}/\text{hm}^2) \leq \text{ESV} < 12\ 000(\text{元}/\text{hm}^2)$  为中 ESV 区、 $\text{ESV} \geq 12\ 000(\text{元}/\text{hm}^2)$  为高 ESV 区进行划分。

从 ESV 空间分布分析的结果可以看出(图 1),2000,2010,2018 年天山北坡城市群 ESV 空间分布特征相似,城市群空间分布呈现出西北部和中部高,北部和东南部低的空间分布特征,高 ESV 区主要沿

玛纳斯河和乌鲁木齐河流域、北疆山地(博格达山、天山)分布;中 ESV 区主要延绿洲城市由东向西呈条状蔓延;而低 ESV 区小部分聚集在城市的建成区,大部分分布在乌鲁木齐市达坂城区、吐鲁番盆地、以及昌吉州北部地区;因该地区属于荒漠地带,年降水量较小,加上恶劣的自然环境导致 ESV 较低。研究区低 ESV 区 > 高 ESV 区 > 中 ESV 区,近 20 a 来(表 5),低 ESV 区和高 ESV 区平均面积分别超过  $1.15 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,  $5.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,且分布比较集中。近些年来,低 ESV 区和高 ESV 区的面积也在不断地缩减,并开始向中 ESV 区转移,中 ESV 区面积上升率为 11.43%,高 ESV 面积的下降率为 4.57%。由此可以看出研究区生态环境发展不容乐观,需要加大生态环境的治理力度。

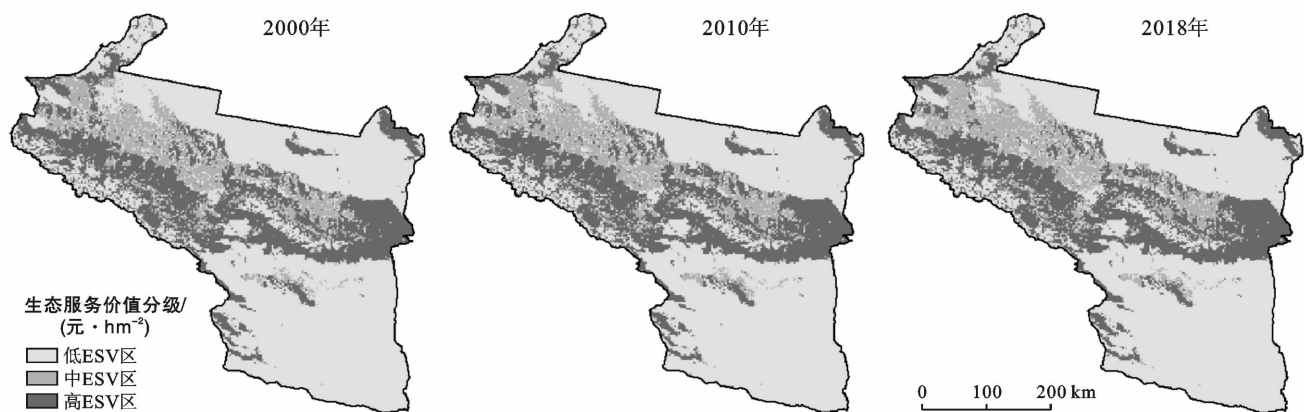


图 1 天山北坡城市群 2000—2018 年低、中、高 ESV 区空间分布

单纯从 ESV 空间分布来看,并不能完全展现出研究区各行政区域的空间生态服务价值分布状况,因此计算出各行政区的不同年份的 ESV 总量(表 8)。由结果可知,乌苏市 ESV 总量最大,2000—2018 年平均 ESV 约为 164.90 亿元;石河子市的 ESV 总量最小,近 20 a 年平均 ESV 仅为 3.98 亿元。综合空间

和时间变化对比发现,2000—2010 年、10 a 间 ESV 总量变化波动较小,研究区 ESV 总量呈现出小幅度上升的特点;其中克拉玛依市和沙湾县 ESV 总量增加最为明显,其余县市变化较为平稳。2010—2018 年出现了幅度较大、范围较广的生态服务价值减少趋势,主要集中在乌鲁木齐市、石河子市、五家渠市、昌

吉市、玛纳斯县、奎屯市等经济较发达的县市 ESV 减少最为剧烈。

总体来看 2000—2018 年,天山北坡城市群中有 6 个县市的 ESV 总量上升,11 个县市 ESV 总量下降;

ESV 总量提升的县市主要分布在天山北坡城市群的东部的木垒县、吐鲁番地区的县市以及西北部的克拉玛依市;其中克拉玛依市的 ESV 总量增加最为明显,ESV 总量净增加 1.31 亿元。

表 8 天山北坡城市群 2000—2018 年各行政县市 ESV 变化

行政区	2000 年		2010 年		2018 年		2000—2018 年	2000—2018 年
	单位面积 ESV ( $\text{hm}^2/10^3$ 元)	ESV 总量/ $10^8$ 元	单位面积 ESV ( $\text{hm}^2/10^3$ 元)	ESV 总量/ $10^8$ 元	单位面积 ESV ( $\text{hm}^2/10^3$ 元)	ESV 总量/ $10^8$ 元	ESV 变化量/ $10^8$ 元	变化趋势
乌鲁木齐市	10.03	149.18	9.99	148.56	9.80	145.71	-3.47	↓
昌吉市	10.81	81.13	10.76	80.85	10.66	79.99	-1.14	↓
玛纳斯县	8.72	83.66	8.70	83.52	8.60	82.54	-1.12	↓
呼图壁县	10.36	97.56	10.29	96.94	10.22	96.28	-1.28	↓
阜康市	6.89	58.84	6.95	59.30	6.85	58.47	-0.37	↓
吉木萨尔县	7.86	64.04	7.82	63.69	7.70	62.68	-1.36	↓
奇台县	6.05	100.71	6.05	100.68	6.03	100.29	-0.42	↑
木垒自治县	9.58	127.47	9.58	127.39	9.61	127.76	0.29	↑
托克逊县	5.29	83.07	5.32	83.43	5.31	83.33	0.26	↑
高昌区	5.04	68.55	5.04	68.45	5.07	68.89	0.34	↑
鄯善县	2.87	109.93	2.88	110.15	2.88	110.16	0.23	↑
克拉玛依市	6.57	56.83	6.74	58.34	6.72	58.14	1.31	↑
乌苏市	11.60	165.92	11.59	165.71	11.46	163.86	-2.06	↓
奎屯市	12.25	13.86	11.95	13.26	11.15	12.38	-1.48	↓
沙湾县	10.78	136.61	10.97	139.01	10.83	137.33	0.71	↑
石河子市	9.28	4.27	8.94	4.11	8.27	3.81	-0.46	↓
五家渠市	12.89	9.15	12.23	8.68	12.08	8.58	-0.57	↓

### 3.3 敏感性分析

利用敏感性分析公式,将各土地类型的生态服务价值系数上下调整 0.5,计算出了天山北坡城市群各土地利用类型的敏感性指数。由表 9 可以看出,2000—2018 年的各土地利用类型的敏感性指数均小于 1,说明天山北坡城市群的生态服务总价值对生态服务价值系数缺乏弹性,修正系数适合研究区,由此可以证明结果可信。2000—2018 年耕地和水域的敏感性指数增大,说明近 20 a 来耕地和水域的生态服务价值系数对天山北坡城市群的生态服务总价值的作用增强。研究期林草地和未利用地的敏感性系数不断地下降,说明这 3 种土地类型的生态服务价值系数对研究区总的生态服务价值产生了减弱的作用。草地的敏感性指数为 0.581 3~0.610 9,是敏感性指数最大的土地类型,其次是耕地和未利用地,敏感型指数分别为 0.129 6~0.167 0,0.124 1~0.122 7,林地和水域的敏感型指数较小,为 0.061 0~0.084 6。

表 9 天山北坡城市群生态系统服务价值的敏感性

年份	耕地	林地	草地	水域	未利用地
2000	0.129 6	0.062 3	0.610 9	0.073 2	0.124 1
2010	0.142 2	0.061 5	0.599 2	0.078 3	0.123 1
2018	0.167 0	0.061 0	0.581 3	0.084 6	0.122 7

### 3.4 生态服务价值景观格局变化分析

基于天山北坡城市群 2000,2010,2018 年 ESV 空间分区异图,采用 Fragstats 4.2 软件计算研究区低、中、高 ESV 区的景观指数,选用斑块类型水平的指数(表 10),探讨研究区近 20 a 来天山北坡城市群的 ESV 景观格局变化,通过斑块类型水平上的景观格局的变化来进一步展示人类活动对生态环境的影响。研究期时间段内,低 ESV 区的 NP 呈现出先增加后减少的变化趋势,2000—2010 年,低 ESV 区的 NP 不断地增加,表明这段时间里景观破碎化严重。与此同时,最大斑块指数 LPI 呈下降趋势,表明低 ESV 区的景观优势度削弱,人类活动在低 ESV 区逐渐增强。城镇化的发展影响着低 ESV 区的景观结构,导致景观破碎化加剧;同时在这段时间内大众的环保意识薄弱,为了快速提高 GDP,工业发展迅速,导致三废的排放增加,产生一系列空气河流污染的严重环境问题,造成低 ESV 区的景观破碎化严重。2010—2018 年,低 ESV 区的 NP 减少,这段时间内,环境保护受到重视,人口资源环境协调发展成为城市群关注的重点,低 ESV 区的破碎度减小。研究期间,低 ESV 区的 AI 不断地增加,说明随着社会的发展,斑块聚集度增加。中 ESV 区的 NP 最多,且整体呈

下降趋势;同时,LSI 指数逐渐减小,说明中 ESV 区内部生态功能加强,景观破碎度减弱,斑块复杂度降低。中 ESV 区 LPI 和 AI 分别由 2000 年的 6.73,54.75 增加到 2018 年的 8.01 和 59.87,因为中 ESV 区食物生产 ESV 功能逐年增强,粮食作物种植的增多使得中 ESV 区景观斑块更趋向于集中连片,连片斑块规模增加,集聚度上升明显,景观优势也在不断地增强。高 ESV 区受人类活动的影响,SPLIT 不断地增加,LPI 不断地下降,说明生态系统的破坏强度增大,景观优势度减弱,景观分散度加大。因受气候变化和社会畜牧业不合理因素的影响,以及人类在高 ESV 区进行开垦和挖掘,导致高 ESV 区的植被稀疏、水土流失严重,高 ESV 区的土壤保持和生物多样性的生态功能锐减,景观优势度减小,景观破碎化程度加深,研究前期聚集度大于后期,说明研究后期高 ESV 区环境受人类活动更为频繁。

表 10 天山北坡城市群 2000—2018 年低、中、高 ESV 区斑块类型水平指数

景观指数	类型	2000 年	2010 年	2018 年
CA/km <sup>2</sup>	低值区	115 162.50	113 918.75	114 325.00
	中值区	27 768.75	29 681.25	30 943.75
	高值区	51 118.75	50 450.00	48 787.50
NP	低值区	491	501	489
	中值区	567	551	537
	高值区	255	246	245
SPLIT	低值区	8.03	8.15	8.14
	中值区	207.52	170.42	144.97
	高值区	27.16	27.66	30.00
LPI	低值区	29.71	29.60	29.65
	中值区	6.73	7.44	8.01
	高值区	19.11	18.95	18.20
LSI	低值区	16.75	16.40	16.49
	中值区	30.55	29.38	28.78
	高值区	22.59	22.13	21.97
AI	低值区	88.29	88.46	88.44
	中值区	54.75	58.16	59.87
	高值区	75.85	76.17	75.95

注:CA:斑块面积;NP:斑块数量;SPLIT:斑块分散度;LPI:最大斑块指数;LSI:景观形状指数;AI:斑块聚集度。

## 4 结论和讨论

### 4.1 结论

(1) 天山北坡城市群未利用地、草地约占研究区总面积的 85%,研究区土地利用呈现出耕地、建设用地、水域面积增加,草地、林地、未利用地面积减少的

特点;2000—2018 年耕地、草地、建设用地、水域的动态变化较为明显,动态度分别为 0.88%, -0.27%, 2.77%, -0.29%;土地利用转移主要表现出草地与未利用地—耕地、耕地与未利用地—草地、耕草地与未利用地—建设用地转移的局势,其他地类转移幅度较小。

(2) 2000—2018 年天山北坡城市群生态服务价值发展趋势先增加后减少,ESV 净减少 10.59 亿元。从单向生态服务价值来看,表现为:调节服务>支持服务>供给服务>文化服务;其中支持服务 ESV 损失最多,草地大量减少是造成该模块 ESV 减少的主要原因。从研究区各个行政区的 ESV 变化总量上来看,近 20 a 乌鲁木齐市和乌苏市的 ESV 总量下降较多,克拉玛依市 ESV 总量增加最多;从 ESV 的空间格局变化上来看,研究区 ESV 呈现出西北部和中部高、北部和东南部低的空间分布特征,并且低 ESV 区和高 ESV 区的面积在不断地缩减,并开始向中 ESV 转移。

(3) 天山北坡城市群生态服务价值的特征可以看出:低 ESV 区的集聚度最高是研究区的优势景观,景观破碎化严重;中 ESV 区的景观形状最为复杂,景观分散度减小,景观优势度增加,景观趋于连片发展;高值区的集聚度先上升后下降,景观优势度弱化。

(4) 草地对天山北坡城市群的生态服务价值维系起着主导性的作用,草地所分布的区域是高 ESV 区,由于草地面积大量流失,所以高 ESV 区的生态变化明显,景观优势度削弱;因此将来的生态保护需要更加侧重于草地生态系统的保护。

### 4.2 讨论

城市群作为新型城镇化的空间主体,城市群的发展不可避免会对生态环境产生重大影响,这种影响对于山地—绿洲—荒漠的天山北坡城市群尤为明显,所以对于干旱区绿洲城市群的生态服务价值的研究非常必要。从研究结果可以看出,近 20 a 来研究区的生态环境不容乐观,从而致使研究区的 ESV 总量有所减少。针对不同的 ESV 等级需要采取不同的措施治理城市群的生态环境,对于高 ESV 区(乌鲁木齐市、木垒哈萨克自治县、奇台县、呼图壁县),减少或者禁止对林草地的破坏和开垦,采用更多元的生态修复工程,政府强化落实监管责任,加之引导人们树立正确生态保护理念,减轻人为对生态环境的干扰程度;对于中 ESV 区,尤其是以农业发展为主的县市(石河子市、玛纳斯县、沙湾县、乌苏市、奎屯市),通过改善研究区的农业种植结构和技术来提高粮食的单位面积



产量,大力推广林果业的种植,进而使研究区的 ESV 有所提高;对于低 ESV 区,要因地制宜合理进行开发未利用土地,科学合理地划定城市群建设用地的生态红线,增加建成区的生态用地,人工开发小湖泊,积极调整产业结构,保持生态和经济发展和谐共生,对于未利用地根据当地的实际情况适当开发和利用,从而减轻对生态系统的压力。

本研究利用空间统计分析等方法,揭示了研究区在土地利用变化背景下 ESV 时空演变规律,并在此基础上探究了低、中、高 ESV 区受人类活动强弱的影响状况。近年来,我国关于 ESV 的研究涌现出丰硕的成果,以往的研究多是对土地利用类型的景观指数进行计算,但是从景观格局角度出发对不同等级 ESV 景观变化特征进行探索的不多,该研究在一定程度上丰富了 ESV 的研究内容。在单位面积 ESV 系数的核算方面,虽然在谢高地当量因子法的基础上对价值系数进行了适当的修订,但是鉴于干旱区城市群生态系统的复杂性,本文的研究考虑仍是不全面的。今后 ESV 研究中应采用一套更为合理的修正方法,更能准确地体现出干旱区城市群的生态服务价值变化,比如可以结合遥感影像将研究区生态系统净初级生产力(NPP)和绿值指数纳入到研究中来,使研究的结果更有价值性和说服力。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013,110(1):3665-3672.
- [2] 魏慧,赵文武,张骁,等. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为例[J]. 生态学报, 2017,37(11):3830-3839.
- [3] 吴攀,杨木壮,刘伟聪. 2007—2015 年东莞市土地利用及其生态系统服务价值的时空演变[J]. 水土保持通报, 2020,40(1):250-255.
- [4] 刘晓娜,封志明,姜鲁光,等. 西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 233-244.
- [5] Daily G C, Soderqvist T, Aniyar S, et al. The value of nature and the nature of value [J]. Science, 2000, 289(5478):395-396.
- [6] 王金凤,刘方,白晓永. 西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7057-7066.
- [7] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1998,387(1):3-15.
- [8] 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.
- [9] 王希义,徐海量,潘存德. 和田河流域土地生态系统服务价值变化及敏感性研究[J]. 水土保持研究, 2017,24(6): 334-340.
- [10] 汪东川,孙志超,孙然好,等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7):1285-1296.
- [11] 尹登玉,张全景,翟腾腾. 山东省土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5):134-143.
- [12] 柴仲平,王雪梅,蒋平安. 石河子市土地利用变化及其对绿洲生态系统服务功能影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010,24(10):19-24.
- [13] 杨延成,阿里木江·卡斯木,祖拜旦·阿克木,等. 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[J]. 冰川冻土, 2019,41(4):1005-1014.
- [14] 杨怀宇,王春晓,郭宗香,等. 池塘养殖生态系统空气调节服务价值的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009,18(5):432-438.
- [15] 刘兴元,龙瑞军,尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 167-174.
- [16] 吴娇,李月臣. 三峡库区(重庆段)景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018,34(4):308-317.
- [17] 周渝,邓伟,刘婷,等. 重庆都市区生态系统服务价值时空演变及其驱动力[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 249-256.
- [18] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局[J]. 干旱区地理, 2019,42(1):1-11.
- [19] 方创琳,高倩,张小雷,等. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响:以天山北坡城市群为例[J]. 中国科学:地球科学, 2019,49(9):1413-1424.
- [20] 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):81-87.
- [21] 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.
- [22] 许丽敏,李虎,陈冬花,等. 生态服务价值时空变化特征及其驱动力:以新疆博州为例[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018,13(1):66-74.
- [23] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究中[J]. 中国生态农业学报, 2005,13(3):10-13.
- [24] 刘川. 新疆土地生态系统服务价值研究[D]. 新疆阿拉尔:塔里木大学, 2019.
- [25] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2007. 106-124.