

DOI: 10.5846/stxb201604290823

李哲, 张飞, Hsiang-te Kung, 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.

Li Z, Zhang F, Hsiang-te Kung, Zhang Y, Jing Y Q. Spatial and temporal ecosystem changes in the Ebinur Wetland Nature Reserve from 1998 to 2014. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 4984-4997.

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

李 哲^{1,2}, 张 飞^{1,2,3,*}, Hsiang-te Kung⁴, 张 月^{1,2}, 井云清^{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 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

4 美国孟菲斯大学地球科学系, 田纳西州 孟菲斯 38152

摘要:湿地的生态系统服务价值是生态学研究的重点之一。以艾比湖湿地自然保护区为研究区,以 1998 年的 TM 影像、2006 年的 Landsat ETM+影像及 2014 年的 Landsat OLI 影像为数据源,采用 Costanza 生态系统服务价值公式进行生态系统服务价值评估,结合空间自相关模型,定量探讨了艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值时空分异特征。结果表明:(1)近 20 年来,研究区的土地利用/覆被变化显著,除了水体和裸地面积减少,其它土地覆被类型面积都有不同比例的增加。(2)在生态系统服务价值方面,近 20 年来 ESV(Ecosystem Services Values)整体变化不大,但近年 ESV 有所降低,生态环境出现恶化趋势。(3)在生态系统服务的时空变异方面,研究区 ESV 空间正相关显著,空间集聚程度高值区主要集中在艾比湖水域和湿地,并且高值区有增加向减少转变的趋势,低值集聚区在湖区四周,且逐年增加。(4)近 20 年来,影响研究区生态系统服务价值时空变化的驱动力因素主要包括自然因素和人为因素,人为因素是研究区生态系统服务价值时空变化的主要驱动因素。

关键词:生态系统服务价值;时空分异;空间自相关;艾比湖湿地自然保护区

Spatial and temporal ecosystem changes in the Ebinur Wetland Nature Reserve from 1998 to 2014

LI Zhe^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2,3,*}, Hsiang-te Kung⁴, ZHANG Yue^{1,2}, JING Yunqing^{1,2}

1 College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

3 General Institutes of Higher Learning Key Laboratory of Smart City and Environmental Modeling, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

4 Department of Earth Sciences, University of Memphis, Memphis, USA 38152

Abstract: Ecosystem services are the direct and indirect contributions of ecosystems to human wellbeing and survival, and they provide cultural and economic benefits for sustaining and fulfilling the well-being of humans the living organisms. Wetlands are an important component of ecosystem environments, especially for economic and agricultural development via their roles in flood reduction and nutrient cycling, as well as water conservation, regulating atmospheric composition and maintaining biodiversity. In recent years, many researchers have studied spatial ecosystem patterns and factors influencing

基金项目:国家自然科学基金项目(41361045);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2016D01C029);新疆联合基金本地优秀青年培养专项(U1503302)

收稿日期:2016-04-29; **网络出版日期:**2017-03-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangfei3s@163.com

the value of ecosystem services, although few studies have focused on how the intensity of land use in these areas affects ecological changes. We selected the Ebinur Wetland Nature Reserve as our study site to analyze the spatial distribution and dynamics of ecosystem services. We used 1998 TM Landsat images, 2006 ETM+ Landsat images, and 2014 OLI Landsat images to analyze land use changes over these periods and used the computational formula from the Costanza ecosystem service value to study the auto-correlation of land use changes in the study area. The results of the study are: (1) Over the past 20 years, land use significantly changed, with all land use practices increasing except in the water area and bare land area. (2) Changes in ESV (Ecosystem Services Values) were been insignificant in the past 20 years, with ESV decreasing, suggesting that the ecological environment is subject to a degradation trend. (3) The spatial-temporal variation of ESV was prominent; spatial correlation was significant and the degree of spatial agglomeration was relatively high in the study area. High values were distributed mainly in the water area and wetland region, with these high-value regions exhibiting a decreasing trend. Low values occurred around the lake areas, which increased over time. (4) The influence of spatial-temporal changes in the ecosystem service values was insignificant and human driving factors will become the main driving forces influencing the spatial-temporal changes of ecosystem services values.

Key Words: ecosystem services value; spatial-temporal variation; spatial correlation; Ebinur Wetland Nature Reserve

实现人类可持续发展的基础是维持和保护生态系统服务^[1],生态系统是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的产品和服务^[2],是人类生存和发展的基本条件和自然资本。生态系统服务功能指生态系统与生态过程形成及维持人类生存发展的自然环境条件^[3],对其价值进行定量评估能够合理配置环境资源^[4]。

湿地是生态系统的主要组成部分,具有蓄洪防旱、调节气候、降解污染物、教育科研、促淤造陆等多重生态服务功能^[5]。但随着工业化进程的加快和城市化的发展,湿地生态环境遭到严重破坏,国外众多学者开始重视湿地生态服务功能的研究。如 Turner 等在 2003 年提出的湿地生态经济分析的框架及空间分析方法,为湿地生态系统经济价值的评估及在可持续发展战略中的应用提供依据^[6]; Mitsch 等分析了不同尺度湿地生态系统服务功能价值; Daubert 等评价了水的娱乐价值^[7]; Richard 等全面总结了湿地生态系统服务功能的案例及价值评价方法^[8]。此外,生态系统服务价值在流域^[9]、单个生态系统以及物种^[10]和生物多样性保护^[11]价值评估领域也开展了大量研究。21 世纪初,湿地评价研究在全国各地展开,分别在鄱阳湖^[12]、三洋^[13]、黄河三角洲湿地^[14]、南沙红树林^[15]等地进行了湿地价值评价研究。但是国内的研究主要集中在全国尺度,省域和市域等宏观尺度上,而针对县域尺度,特别是西北干旱区县域绿洲的研究报告较少^[16]。

空间统计分析主要应用在空间数据的分类和综合评价,其核心是了解数据间的依赖程度、空间关联度或空间自相关,通过空间位置建立数据间的统计关系^[17]。与各种地理实体一样,生态系统服务价值同样存在空间关联性,而之前大量研究停留在静态研究,忽视了它的动态性和复杂性,因此定量研究生态系统价值的关联度,有利于全面理解生态系统服务价值的空间格局特征^[18]。

针对西北干旱区应用生态系统价值评估和空间统计相结合的方法解决环境问题是一个新的尝试。多年来,处于生态脆弱区的艾比湖湿地自然保护区生态环境不断恶化,因此本文以艾比湖自然保护区为靶区,通过对艾比湖湿地自然保护区生态系统服务功能价值定量研究,对恢复和保护艾比湖湿地,加快艾比湖流域生态环境综合治理,具有一定的理论和实践意义。

1 研究区概况

艾比湖湿地自然保护区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州境内(44°30′—45°09′N, 82°36′—83°50′E)根据博州林业局统计年鉴,在行政区划上地跨博尔塔拉蒙古自治州精河县、博乐市和阿拉山口口岸。此处是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐汇集中心,处于亚欧大陆腹地,是准噶尔盆地生态环境变化的重要地区^[19]。艾比

湖湿地是我国沙漠风口湖泊湿地,湖水面和湖边植物具有良好的防风固沙作用。在 2007 年 4 月被国务院批准为国家级湿地自然保护区。本研究区为典型的中温带干旱大陆气候,干旱少雨,蒸发量大,日照充足,气候变化剧烈,年均温 5℃,年均降水量 105.17mm,蒸发量 1315mm。特殊的地理位置及气候条件,使其形成了石漠、土漠、盐漠、沼泽等多种沙漠地类,自然保护区内主要土地利用类型包括草地、林地、水域、沙地、盐渍地等。保护区内设置两个中心管护站,下设 11 个保护站,区内常住人口约 400 人,主要从事游牧活动,81%由哈萨克族构成。由于近代工农业生产活动频繁,艾比湖急剧萎缩,湖面面积减小,直接威胁了流域内农牧业的可持续发展^[19]。

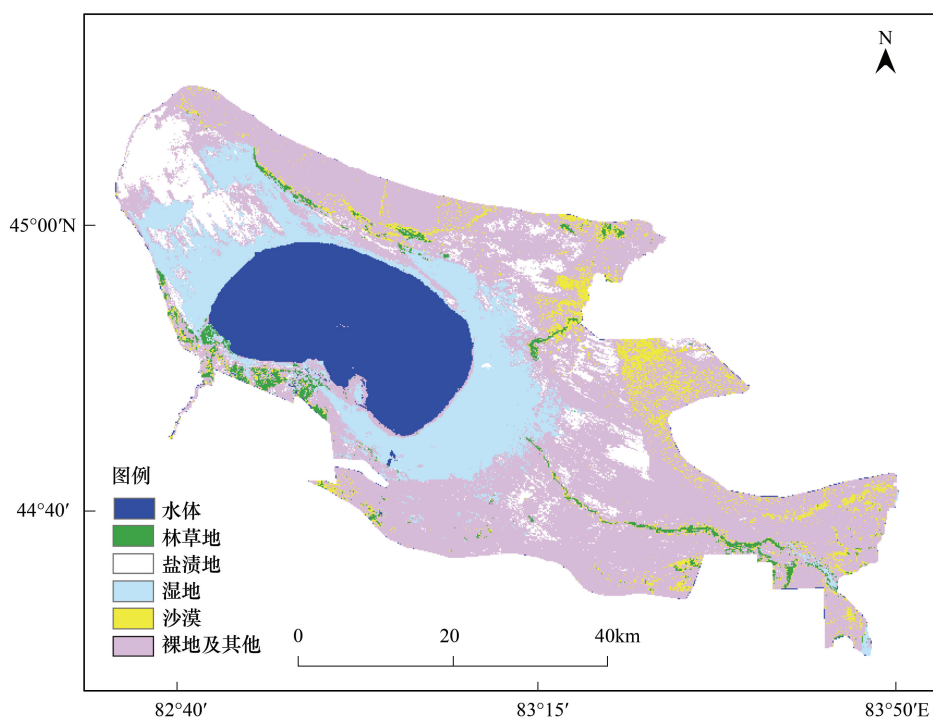


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

2 数据来源与方法

2.1 数据来源与处理

获取了研究区 1998 年 9 月 25 日的 TM 影像、2006 年 8 月 22 日 Landsat ETM+影像和 2014 年 8 月 20 日的 Landsat OLI 影像(数据来源于 <http://earthexplorer.usgs.gov/>),轨道号为 146/29。在 ENVI5.1 软件支持下完成了对遥感影像的几何校正、辐射校正和影像增强等预处理,并对遥感影像进行裁剪获取研究区范围,采用监督分类和目视解译相结合的方法,将艾比湖湿地自然保护区划分为林草地、盐碱地、湿地、水体、沙漠、裸地及其他共 6 类。得到 1998、2006、2014 年土地覆被分类结果。基于混淆矩阵方法进行解译精度评价,3 期遥感影像解译平均精度达到 95% 以上。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化动态指标

利用单一土地利用类型的净变化速度来描述艾比湖湿地自然保护区各土地利用类型的动态变化。净变化速度表达区域一定时间内某一土地利用/覆被类型的数量的速度变化^[21-22],模拟表达式为^[20]:

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

式中, K 为在研究区时段内某一土地利用类型的动态度; U_b, U_a 为研究末期和初期的某一土地利用类型数量; T 为研究的时间跨度, 将 T 的时段设定为年时, K 值就代表该研究区单一土地利用类型的年变化率。

2.2.2 生态系统服务价值评估方法

Costanza 等^[23]从科学角度明确了生态系统服务价值研究的意义和方法, 但研究估算结果仍然存在较大偏差, 如湿地的估计偏高, 耕地的估计偏低等^[24]。谢高地等^[25]在 Costanza 的评价模型基础上, 依据我国实际情况, 结合 200 位生态学家的问卷调查结果, 得出不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表(表 1)。本文在前人研究基础上, 参考艾比湖流域的相关文献^[26], 制定了艾比湖湿地自然保护区的生态系统服务价值, 具体计算模型如下^[20]:

$$ESV = \sum A_k \cdot VC_k \quad (2)$$

$$ESV_f = \sum A_k \cdot VC_k \quad (3)$$

式中, ESV 为生态系统服务价值; A_k 为研究区第 k 种土地利用类型的分布面积; VC_k 为单位面积的生态系统服务价值; ESV_f 为单项生态系统服务功能价值; k 为单项生态系统服务价值系数; f 为土地利用类型。

表 1 不同陆地生态系统单位面积生态服务价值

Table 1 The ecosystem service value per unit area in different Chinese land ecosystem

服务类型 Service type	生态系统服务价值 Ecosystem service value/(元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)				
	湿地 Wetland	林地 Forest	草地 Grassland	水体 Water	未利用地 Unutilized land
气体调节 Gas regulation	1547.10	3097.00	707.90	0.00	0.00
气候调节 Climate regulation	14697.50	2389.10	796.40	407.00	0.00
水源涵养 Water conservation	13322.30	2831.50	707.90	18033.20	26.50
土壤形成与保护 Soil formation and protection	1469.70	3450.90	1725.50	8.80	17.70
废物处理 Waste treatment	15625.70	1159.20	1159.20	16086.60	8.80
生物多样性保护 Biodiversity conservation	2148.80	2884.60	964.50	2203.30	300.80
食物生产 Food production	257.90	88.50	265.50	88.50	8.80
原材料 Raw material	60.20	2300.60	44.20	8.80	0.00
娱乐文化 Entertainment culture	4770.20	1132.60	35.40	3840.20	8.80
合计 Total	53899.40	19334.00	6406.50	40676.40	371.40

2.2.3 敏感性指数

借用敏感性指数(CS)确定生态系统服务价值(ESV)随时间变化对生态系统价值(VC)的依赖程度, 以此为依据验证所选生态价值系数是否适合本研究区。 CS 指 VC 变动 1% 引起 ESV 的变化状况, $CS > 1$, 代表 ESV 对 VC 富有弹性, CS 越大, VC 的准确性越关键; $CS < 1$, 表明 ESV 对 VC 缺乏弹性。即使 $CS < 1$, VC 的值过高或过低, 都会一定程度上影响生态价值随时间变化的准确性。本研究拟将各土地利用类型的生态价值系数分别上下调整 50% 来衡量 ESV 的变化情况。其计算公式如下^[27]:

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

式中, ESV 、 VC 、 k 的含义同前, i 和 j 代表初始价值和生态价值系数调整以后的价值。

2.2.4 空间自相关分析

本文在利用生态系统服务价值评估模型计算出各年的生态系统服务总价值基础上, 采用全局 Moran 散点图和空间联系的局部指标($LISA$)相结合的方法, 进行空间自相关分析, 计算公式参见^[28,30], 构建了生态系统服务价值空间关联模式, 得出了空间关联模式的显著性水平。

参考相关文献^[18], 制作出详细流程(图 2), 分为 A、B、C 三部分。A 为数据的预处理, 包括利用 Arcgis10.0 对图层进行重采样, 格网化, 最终得到 ESV 格网数据; B 为探索局部空间关联模式, 对空间权重矩阵进行计算

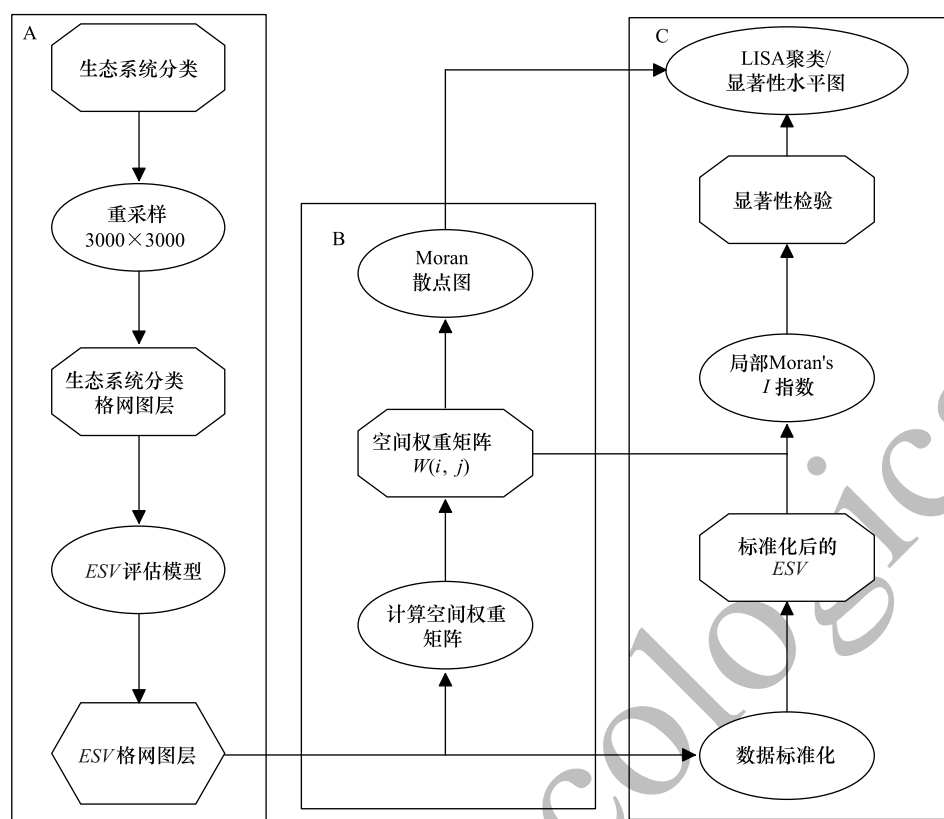


图2 艾比湖湿地自然保护区ESV时空变异分析流程图

Fig.2 The flowchart of spatial-temporal variation analysis of Ecosystem Services Values in Ebainur Wetland natural reserve

得到 Moran 散点图;C 为计算 Moran's I 指数,并进行显著性水平检验,反映空间关联模式的显著性水平,最终得到 LISA 聚类图和 LISA 显著性水平图。

本文利用 Geoda095i 软件计算空间权重矩阵,绘制 Moran 散点图,计算局部 Moran's I 指数,并在显著性 $p=0.01$ 的情况下,利用 99 次置换方法对局部 Moran's I 指数进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 土地利用/覆被变化过程分析

对比 1998 年、2006 年、2014 年 3 期的遥感图像,通过统计得出 1998—2014 年近 20 a 来艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化(表 2)。结果表明,林草地和沙漠是主要变化的土地利用/覆被类型,变化速度分别为 10.22% 和 6.30%,其他土地利用/覆被类型都有不同程度变化,湿地面积增加 9269 hm^2 ,年变化速度最小,占 2.23%。沙漠面积增加 16949 hm^2 ,年变化速度为 6.30%,盐碱地面积增加 19925 hm^2 ,年变化速度为 2.34%,水体面积减少 17825 hm^2 ,年变化速度为 -2.18%,裸地及其他面积减少 39796 hm^2 ,年变化速度为 -1.53%。

从表 2 可以看出,1998—2014 年间艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化总体的趋势是林草地、盐碱地、湿地、沙漠的面积增加,其中增加面积最多的为盐碱地,增加面积 19925 hm^2 ,水体和裸地及其他面积减少,裸地及其他面积减少最多,减少 39796 hm^2 。16 年间,沙漠的面积持续增加,在 2006—2014 年期间增幅最快,达到了 34.07%。裸地及其他面积持续下降,而湿地和水体的面积呈先增加再减少的趋势,盐碱地和沙漠的面积呈先减少后增加的趋势。盐碱地和沙漠面积增加的主要驱动因子是人口和 GDP 的增长,导致水资源总量逐年下降,艾比湖水面积萎缩;林草地面积的持续增加是由于本世纪末,尤其是“九五”期间实施艾比湖流域植树造林综合治理方案,实现造林育林 $8.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$,治理沙漠面积 $9.86 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

表 2 1998—2014 年艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被类型面积变化

Table 2 Change of land use/cover on the Ebinur Wetland natural reserve from 1998 to 2014

年份 Year	项目 Items	林草地 Forest	盐碱地 Saline land	湿地 Wetland	水体 Water	沙漠 Desert	裸地及其他 Bare land and other
1998	面积/hm ²	7023	53326	26035	51217	16816	162695
2006		8940	36373	45751	59235	9063	157750
2014		18502	73251	35304	33392	33765	122899
1998—2006	面积变化/hm ²	1917	-16953	19716	8018	-7753	-4945
	净变化速度/%	3.41	-3.97	9.47	19.57	5.76	0.38
2006—2014	面积变化/hm ²	9562	36878	-10447	-25843	24702	-34851
	净变化速度/%	13.37	12.67	-2.85	-5.45	34.07	-2.76
1998—2014	面积变化/hm ²	11479	19925	9269	-17825	16949	-39796
	净变化速度/%	10.22	2.34	2.23	-2.18	6.30	1.53

3.2 生态系统服务价值的动态变化

由于研究区土地利用/覆被类型的划分与 Costanza 等^[23]人的全球生态系统类型的划分不完全一致,为得到不同土地利用/覆被类型的生态系统服务价值,本文将 Costanza^[23]定义的生态系统类型和研究区划分的土地利用/覆被类型进行对照(表 3)。参考不同陆地生态系统单位服务价值表(表 1),对研究区 1998—2014 年间的生态价值的变化情况进行了估算(表 4),在计算过程中,林草地取林地和草地的平均值^[29]。盐碱地、沙漠和裸地及其他土地覆被类型划分到未利用地之中^[20]。

表 3 与土地利用/覆被类型相对应的生态系统类型及其生态价值系数

Table 3 Ecosystem types corresponding to land use/cover types and their ecological value coefficients

土地利用/覆盖类型 land use/cover types	林草地 Forest /grass land	湿地 Wetland	水域 Water	未利用地 Unutilized land
对应的生态系统 Ecosystem types corresponding to land use/ cover types	森林和草地	湿地	水体	盐碱地/沙漠/裸地及其他
生态价值系数 Ecological value coefficients	12870.25	53899.40	40676.40	371.40

3.2.1 生态系统服务价值的时空变化

水体和湿地土地覆被类型的生态价值系数较高,这类用地的变化将极大地影响流域生态系统服务价值的变化。根据艾比湖湿地自然保护区不同土地利用/覆被类型的生态系统服务价值系数,计算 1998—2014 年研究区的生态系统服务价值及其变化(表 4,表 5)。

由表 4 可以得到,1998 年、2006 年和 2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值分别为 36.57×10^8 元, 50.60×10^8 元和 35.74×10^8 元,呈现出先增加后减少的趋势。从生态系统服务价值所占比例来看,水体和湿地所占比例最多,水体和湿地的生态系统服务价值是生态系统服务的主体。其中,ESV 呈现持续增长的为林草地,ESV 呈现先增加后减少的为湿地和水体,ESV 呈现先减少后增加的为盐渍地和沙漠,ESV 呈现持续减少的为裸地及其他土地覆被类型。

由表 5 可以得到,1998—2014 年期间,林草地的 ESV 增长的变化率最大,最大值为 10.25%,增加了 1.41×10^8 元,增加的变化率次之的是湿地,增加了 5×10^8 元,盐碱地减少的变化率最大,最大值为 -19.40%。1998—2006 年期间,ESV 增幅最大的是湿地,ESV 减少幅度最大的是沙漠,年变化率达到 -6.25%。2006—2014 年期间,ESV 增幅最大的是沙漠,年变化率达到 41.67%,ESV 减少幅度最大的是水体,年变化率达到 -5.45%。总体来看,近 20 年流域的生态系统服务价值出现减少的趋势,这与流域资源的过度开发利用密切相关。

为方便艾比湖湿地自然保护区各土地利用/覆被类型的 ESV 差异对比,本文利用 Arcgis10.0 绘制出研究区 3 个时期 ESV 的空间分异图(图 3)。将艾比湖湿地自然保护区 1998—2014 年生态系统服务价值从低到高

划分为 6 个等级,从图中可以看出,研究区的 ESV 存在明显的空间分异差异。从空间上看,在近 20 年内,水体和湿地的 ESV 一直保持在高值范围内,水体周围的其他土地覆被类型处于低值范围。从时间的变化情况看,1998—2006 年期间,由于湖面面积和湿地的增加,致使水域和湿地 ESV 升高,其他类型的土地覆被类型 ESV 没有明显变化;2006—2014 年期间,研究区西北地区的湖面面积萎缩,加上生态环境的恶化,致使 ESV 整体呈现下降趋势。

表 4 1998—2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值

Table 4 The ecosystem service value on the Ebinur Wetland natural reserve from 1998 to 2014

土地利用/覆盖类型 Land use/cover types	1998		2006		2014	
	价值		价值		价值	
	Value/ 10^8 元/a	%	Value/ 10^8 元/a	%	Value/ 10^8 元/a	%
林草地 Forest/grass land	0.86	2.35%	1.09	2.15%	2.27	6.35%
盐碱地 Saline land	0.19	0.52%	0.14	0.27%	0.27	0.76%
湿地 Wetland	14.03	38.37%	24.66	48.74%	19.03	53.25%
水体 Water	20.83	56.96%	24.09	47.61%	13.58	37.99%
沙漠 Desert	0.06	0.16%	0.03	0.06%	0.13	0.36%
裸地及其他 Bare land and other	0.60	1.64%	0.59	1.17%	0.46	1.29%
总计 Total	36.57	100.00%	50.60	100.00%	35.74	100.00%

表 5 1998—2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值变化情况

Table 5 Change of the ecosystem service value on the Ebinur Wetland natural reserve from 1998 to 2014

时间段 Time interval	生态系统服务价值及其变化 Change of the ecosystem service value	林草地 Forest	盐碱地 Saline land	湿地 Wetland	水体 Water	沙漠 Desert	裸地及其他 Bare land and other
1998—2006	生态系统服务价值变化/ $\times 10^8$ 元	0.23	-0.05	10.63	3.26	-0.03	-0.01
	年变化率/%	3.34	-3.29	9.47	1.96	-6.25	-0.21
2006—2014	生态系统服务价值变化/ $\times 10^8$ 元	1.18	0.13	-5.63	-10.51	0.10	-0.13
	年变化率/%	13.53	11.61	-2.85	-5.45	41.67	-2.75
1998—2014	生态系统服务价值变化/ $\times 10^8$ 元	1.41	-0.59	5.00	-7.25	0.07	-0.14
	年变化率/%	10.25	-19.40	4.45	-2.18	0.73	-1.46

3.2.2 生态系统单项服务价值的动态变化

根据公式(3)计算出各生态系统服务功能的价值(表 6)。分析可知,水源涵养和废物处理 2 项生态系统服务功能所占比例超过 60%,食物生产和原材料所占比例小于 1%,说明研究区服务性价值大于生产性价值;水体和湿地相对于其他类型的 ESV 较大,整体来看,近 20 年来,由于艾比湖湖面萎缩,水源涵养的 ESV 持续下降,废物处理、生物多样性保护、食物生产和娱乐文化的 ESV 先增加后减少,其余服务类型的 ESV 都有不同比例的增加。

3.3 敏感性分析

根据 CS 计算公式,本文把生态价值系数分别上下调整了 50%,计算价值系数调整后的艾比湖湿地自然保护区 1998 年、2006 年和 2014 年各土地利用/覆被类型的生态系统服务价值,并估算敏感性指数(表 7)。结果表明,研究区所有土地利用/覆被类型生态系统服务价值系数的敏感性指数(CS)均小于 1,由高到底依次为湿地、水体、林草地、裸地及其他、盐碱地和沙漠,最低值为 0,即当沙漠生态价值系数(VC)增加 1%,总价值无变化,最高值为 0.57,即当水体生态价值系数(VC)增加 1%,总价值增加 0.57%;除了水体和湿地,其他的地类生态系统价值系数变化对研究区生态系统服务总价值的变化影响不大。敏感性分析表明,艾比湖湿地自然保护区的 ESV 对 VC 是缺乏弹性的,即使价值系数存在一定的不确定性,但是整个研究区的 ESV 计算仍然是稳定的,证明研究结果是可信的。

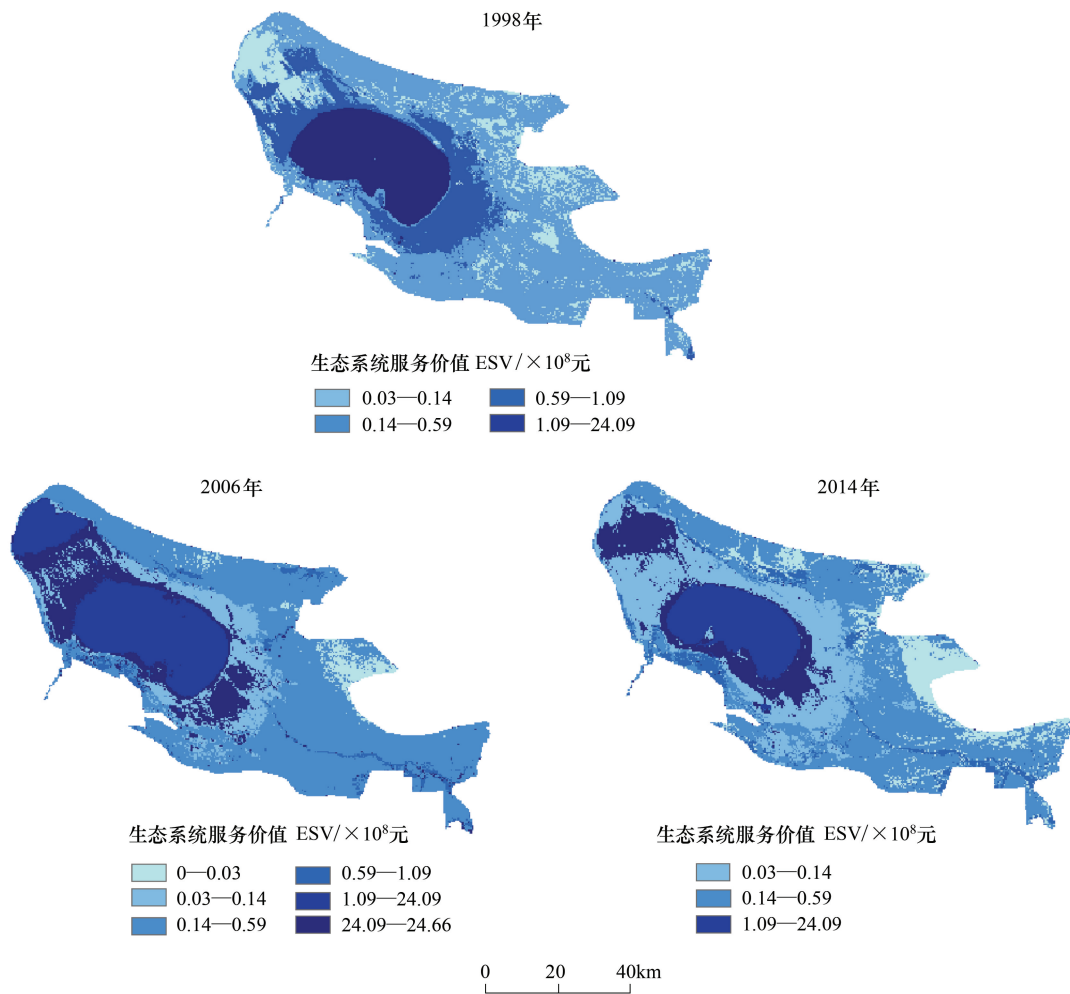


图 3 艾比湖湿地自然保护区 ESV 的空间分异

Fig.3 Spatial differences of the ecosystem services values in Ebinur Wetland natural reserve

表 6 1998—2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统各服务类型价值变化

Table 6 Change of various types of the ecosystem service value on the Ebinur Wetland natural reserve from 1998 to 2014

服务类型 Service type	1998			2006			2014		
	价值 Value/ (10 ⁸ 元)	%	排序 Rank	价值 Value/ (10 ⁸ 元)	%	排序 Rank	价值 Value/ (10 ⁸ 元)	%	排序 Rank
气体调节 Gas regulation	0.54	1.47	7	0.88	1.73	7	0.90	2.51	7
气候调节 Climate regulation	4.15	11.33	3	7.11	14.03	3	5.62	15.72	3
水源涵养 Water conservation	12.89	35.23	1	16.99	33.54	1	11.11	31.08	2
土壤形成与保护 Soil formation and protection	0.61	1.67	6	0.94	1.87	6	1.04	2.91	6
废物处理 Waste treatment	12.41	33.91	2	16.80	33.16	2	11.12	31.11	1
生物多样性保护 Biodiversity conservation	2.52	6.90	5	3.07	6.06	5	2.54	7.11	5
食物生产 Food production	0.10	0.27	9	0.20	0.40	8	0.08	0.23	9
原材料 Raw material	0.10	0.28	8	0.14	0.27	9	0.24	0.67	8
娱乐文化 Entertainment culture	3.27	8.94	4	4.53	8.94	4	3.09	8.66	4
合计 Total	36.59	100.00	—	50.66	100.00	—	35.76	100.00	—

表 7 调整价值系数后总生态系统服务价值的变化及敏感性指数(1998—2014 年)

Table 7 The total ecosystem services value and the sensitivity coefficients after adjusting value coefficients(1998—2014)

价值系数 Value coefficient	ESV ESV/10 ⁸ 元			1998—2014 年变化情况 Years of change from 1998 to 2014		价值系数变化的影响 The influence of the change about value coefficient		
	1998	2006	2014	变化量/×10 ⁸ 元 Change quantity	变化百分率/% Change percentage	1998 年 敏感性指数 Sensitivity coefficients of 1998	2006 年 敏感性指数 Sensitivity coefficients of 2006	2014 年 敏感性指数 Sensitivity coefficients of 2014
林草地 VC+50% Forest/grass land VC+50%	37.02	51.18	36.93	-0.09	0.25	0.02	0.02	0.07
林草地 VC-50% Forest/grass land VC-50%	36.12	50.02	34.55	-1.57	4.34			
盐碱地 VC+50% Saline land VC+50%	36.67	50.89	35.88	-0.79	2.16	0.01	0.01	0.01
盐碱地 VC-50% Saline land VC-50%	36.47	50.31	35.60	-0.87	2.38			
湿地 VC+50% Wetland VC+50%	43.59	62.93	45.25	1.67	3.83	0.38	0.49	0.53
湿地 VC-50% Wetland VC-50%	29.55	38.27	26.23	11.53	11.26			
水体 VC+50% Water VC+50%	46.99	62.65	42.53	-4.46	9.48	0.57	0.48	0.38
水体 VC-50% Water VC-50%	26.15	38.55	28.95	2.80	10.69			
沙漠 VC+50% Desert VC+50%	36.60	50.62	35.80	-0.80	38.42	0.00	0.00	0.00
沙漠 VC-50% Desert VC-50%	36.54	50.58	35.68	-0.86	2.36			
裸地及其他 VC+50% Bare land and other VC+50%	36.87	50.89	35.97	-0.90	2.45	0.02	0.01	0.01
裸地及其他 VC-50% Bare land and other VC-50%	36.27	50.31	35.51	-0.76	2.08			

3.4 ESV 空间自相关分析

3.4.1 全局空间自相关

Moran 散点图用于研究区域空间的异质性^[30],应用 Geoda095i 软件进行全局空间自相关指标计算,获得 1998、2006 和 2014 年的 Moran 散点图(图 4)。

从图 4 可以看出,生态系统服务价值散点主要分布在一、二、三象限,生态系统服务价值具有空间正相关性;从沿趋势线分布的散点情况看,1998 年的自相关程度最强,Moran 指数达到了 0.76,从 2006—2014 年自相关程度减弱;1998 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,2006 年和 2014 年第一、二象限的点较为集中,表明在生态系统价值较高的区域和低高区域各格网间差异缩小。

为了检验 Moran's I 是否显著,在 Geoda 中采用蒙特卡罗模拟的方法检验(图 5)。P 值三期均等于 0.001,说明在 99.9%的置信度下的空间自相关是显著的。

3.4.2 局部空间自相关

聚集图是对 Moran 散点图中通过显著性检验的区域单元的地理表达,ESV 之间的空间聚集主要表现为空间相似值的聚集,利用 Geoda 生成了三期生态系统服务价值 LISA 聚集图(图 6)。

如图 6 所示,图中高值聚集区(红色)主要分布在艾比湖的水域和周边湿地,并且高值区有由增加向减少转变的趋势,低值聚集区(蓝色)在湖区周围,并且逐年增加,低高聚集区(黄色)从 1998—2006 年期间增加明显,2006—2014 年无显著变化,而研究区几乎没有高低(紫色)聚集区。同时,绘制出 LISA 显著性水平图(图 7)。

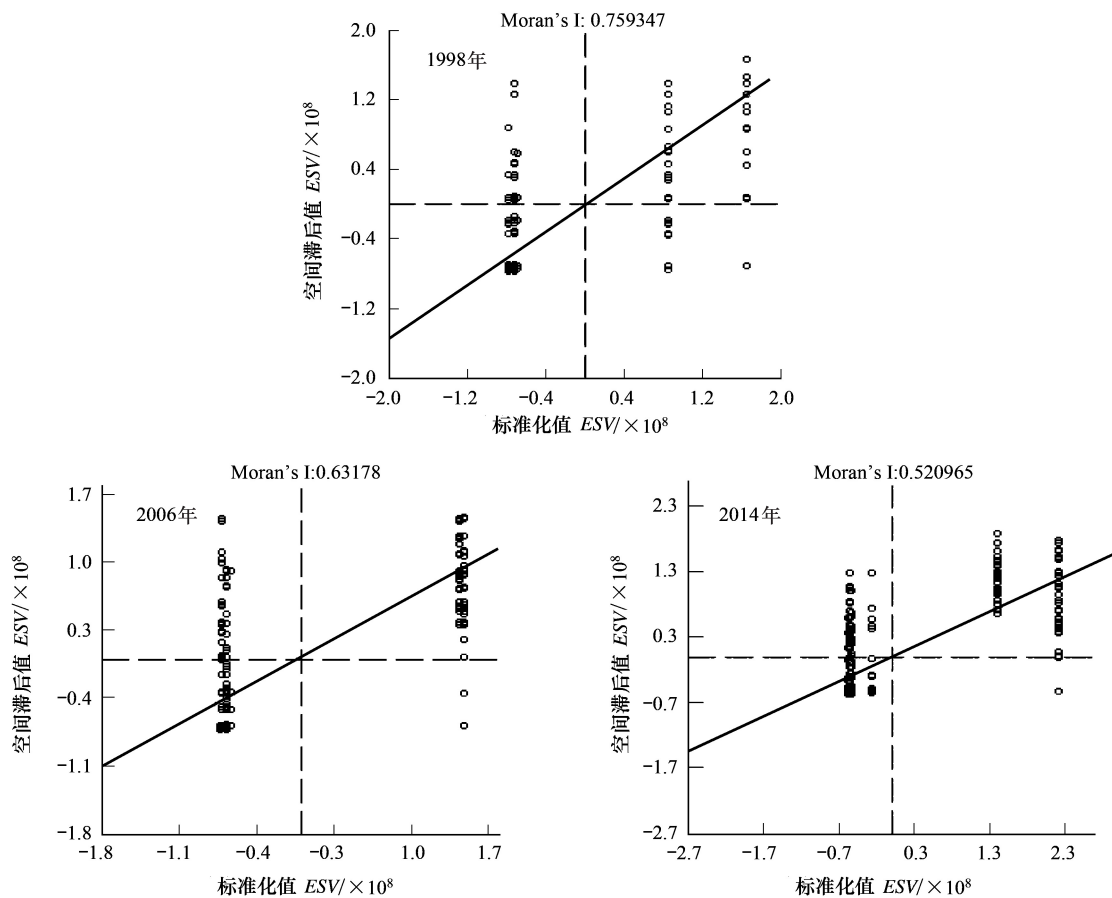


图 4 艾比湖湿地自然保护区 3 个时期 ESV 的 Moran 散点图

Fig.4 Moran scatter plots of the Ecosystem Services Values in Ebinur Wetland natural reserve

LISA 显著性水平图表示和周围单元具有显著空间联系。由图 7 可知,从空间上看,相关性主要存在于高值聚集区和低值聚集区,这些区域的 ESV 表现出较强的空间相关性($P=0.05$);这些区域的 ESV 与邻近地区的 ESV 呈正相关性。在水域和湿地区域达到了 0.001 的显著性水平,表明这一区域 ESV 在空间分布上差异性小,趋同性强,表现出很强的相关性。从时间上看,显著水平($P=0.05$)和较高显著水平($P=0.01$)的区域面积呈先增长后减少的趋势。

3.5 ESV 时空变化驱动力分析

3.5.1 自然因素

依据国家气象中心公布的博州精河县的气候数据可以得出(如图 8),气候暖干化是湖泊萎缩的主要原因。

20 世纪 90 年代新疆平均气温升高了 0.3°C ^[31],由图 8 看出,艾比湖流域典型区域在 1990—2013 年期间总体温度呈缓慢上升趋势。其中 2013 年的年均气温最高,年均气温达到 9.7°C ,1993 年的年均气温最低,年均气温达到 6.8°C ,24a 年均气温为 8.5°C 。另一方面,从 1990—2013 年年均降水量变化图可以看出,气温的升高导致降水的相应减少,这种现象在一定程度上加剧了流域生态系统退化的过程。

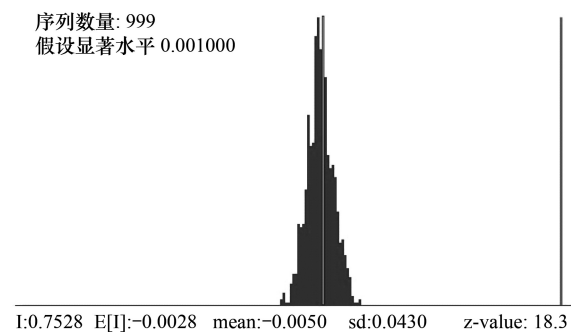


图 5 Moran's I 检验图

Fig.5 Moran's I test

I 代表统计值, $E[I]$ 代表理论平均值, mean 代表平均值, sd 代表标准差, z-value 代表 z 值

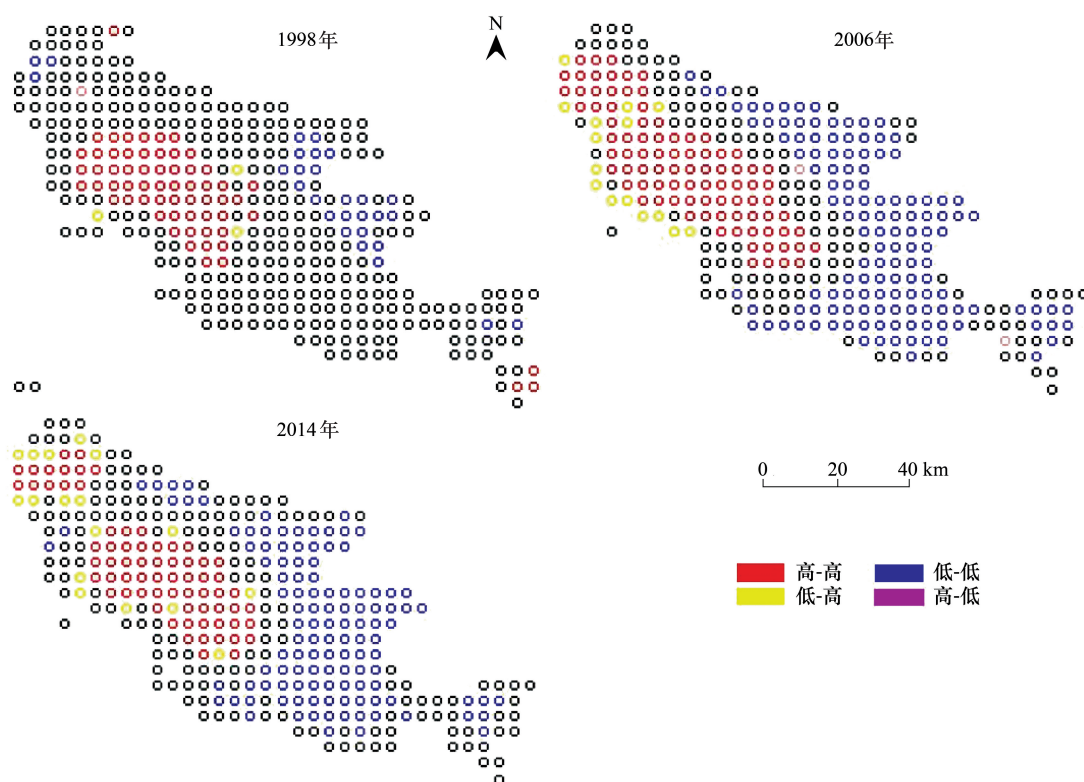


图6 LISA 聚集图

Fig.6 LISA Cluster Map

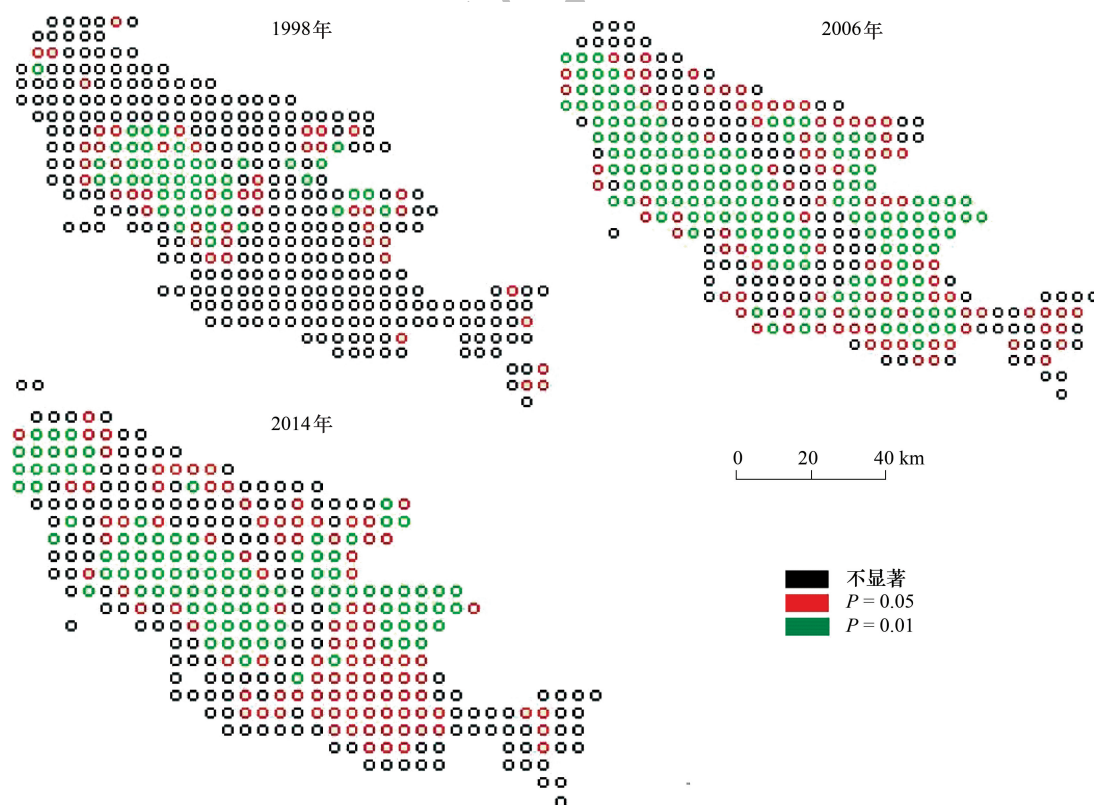


图7 LISA 显著性水平图

Fig.7 LISA Significance Map

3.5.2 人为因素

艾比湖流域临近博尔塔拉蒙古自治州,该地区人口众多,从 20 世纪 50 年代到 70 年代人口急剧增长,年均人口增长率高达 19.9%,1981—1990 年人口年均增长率为 1.38%^[32],人口的过快增长带来需水量的增加,因此大量的人类活动,如在中游地区兴修水利工程,引水灌溉使流域水体不断减少。水域面积的萎缩导致裸露湖床的增加,也致使研究区成为北疆主要的风沙源地。

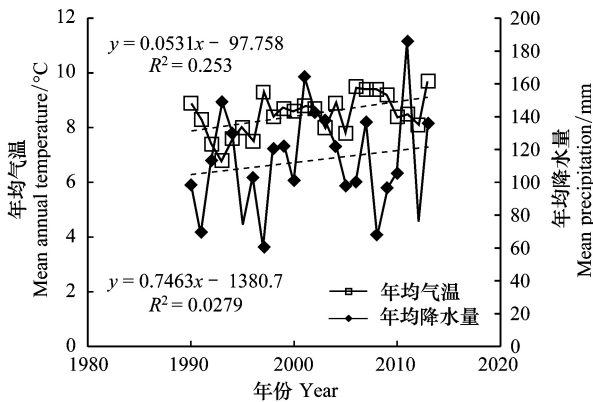


图 8 艾比湖年降水变化和年均气温变化

Fig.8 The curve of annual precipitation and mean temperature in Ebinur Lake

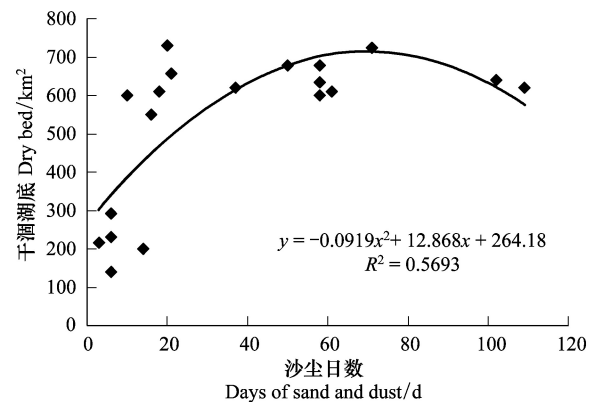


图 9 艾比湖年干涸湖床和沙尘日数变化趋势

Fig.9 The curve of annual dry lake bed and dust days in Ebinur Lake

由图 9 可见,艾比湖的沙尘日数与干涸湖底呈现正相关性,干涸湖床面积的逐年扩大,导致沙尘日数增加。20 世纪末,精河县浮尘天气平均达到 112d,是 60 年代的 9 倍,每年降尘达每平方公里 $2.89 \times 10^8 \text{ kg}$ 。艾比湖湖面积由 1200 km^2 锐减到 500 km^2 ,西北部裸露湖底面积最多,此区域除个别地点外尚无其他植被发育,基本上为完全裸露区域,盐节木密度最高不过每隔 700—800m 一株^[33]。

4 结论与讨论

4.1 讨论

4.1.1 研究方法探讨

生态系统服务价值评估未形成一套完整的评价体系^[34],不同的生态价值服务评估方法,在计算模型、生态系统分类、参数选择等方面不同^[35],其价值评估结果也存在较大差异。如对全球生态系统服务价值的评价,Pimentel^[36]和 Costanza^[23]的结果产生了数量级差异。黄静等^[37]和石龙宇等^[35]基于不同方法估算的厦门市生态系统服务价值相差达 5 倍多。因此,导致研究结果不一致的主要原因可能是生态系统服务价值评估方法的不同。此外,过少的样本数量对统计结果也会有一定程度的影响。因此,本文采用重采样的方法,通过对 3 期影像图系统采样,分别获得 364、352 和 352 个样本点,克服有限数据影响,有利于更准确凸显规律。

本文对生态系统服务价值的研究过程进行了动态评估,利用 GIS 空间分析技术,定量研究生态系统价值的空间关联模式和空间聚集规律,国内西北干旱区湿地生态系统服务价值研究很少从空间分布角度分析生态系统服务价值的变化规律,针对西北干旱区应用生态系统价值评估和空间统计相结合的方法解决环境问题是本文一个新的尝试。本研究可为干旱脆弱区可持续发展和管理,维护、恢复和改善生态系统服务提供一定参考。

由于我国陆地生态系统服务价值当量表以民众对各项服务的生态服务的支付意愿与支付能力为基础,将它分别用到各个城市中,不能体现其差异性,因此在构建区域生态系统服务价值评估模型时,应该具体考虑到当地民众对各项生态系统服务的支付能力和支付意愿,制定出较全面的艾比湖湿地自然保护区生态系统单位面积生态服务价值表。

4.1.2 与内陆湖相关研究对比分析

参照已有的湿地生态系统服务价值研究结果^[38],将研究区湿地功能价值与我国内陆湖泊的其他相关研究进行对比,研究结果显示:地处西北干旱区的湿地生态系统的生态服务价值总体偏低,主要受气候环境的影响,湿地生物多样性少,净化水质、土壤保持、水源涵养等生态服务功能减弱,加上人为活动的双重影响,其生态系统服务价值进一步下降。新疆艾比湖湿地属于干旱内陆区代表性湿地,生态环境极其脆弱,间接降低了该湿地生态服务功能价值;而同属干旱内陆区的宁夏平原湿地,却能够提供较高的生态系统服务价值,可能因为宁夏湿地是以黄河干流两侧为主的黄河湿地,景观类型多样,其形成、演替、消长与黄河密切相关^[38];银川平原湿地与青海湖湿地地理位置相似,但青海湖湿地的服务功能远低于银川平原湿地,可能由于青海湖湿地生态环境脆弱,高寒气候显著,多年水资源利用不合理,土流失严重,人为因素的长期干扰,导致湿地生态功能较小;而黑河湿地保护区的生态服务价值较高,这是由于该地开发较晚,受人类活动影响小,进而保存了较高的生态功能价值^[39]。

4.2 结论

(1)近 20 年来,研究区的土地利用处于发展阶段,总体处于粗放利用和集约利用型之间。土地利用变化显著,1998—2014 年间艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化总体的趋势是林草地、盐碱地、湿地、沙漠面积增加,水体和裸地及其他面积减少。由于水资源总量减少和用水需求的增加,研究时段内水体面积呈现减少趋势;艾比湖湖面的萎缩,最终导致土壤盐渍化,土地沙漠化不断加重;退耕还林、沙漠化治理、生态建设等政策使林草地得到一定程度的保护,致使林草地的面积增加。

(2)艾比湖湿地自然保护区在 1998、2006、2014 年这 3 年的生态系统服务价值(ESV)分别为 22.63×10^8 元, 26.11×10^8 元和 16.84×10^8 元,呈现出先增加后减少的趋势。从生态系统服务价值所占比例来看,水体和湿地所占比例最多,是生态系统服务的主体。从空间分布来看,研究区的 ESV 总体呈现中间高,两边低的分布格局。从时间的变化情况看,1998—2006 年期间,由于湖面面积的增加,致使水体的 ESV 升高,其他类型的土地覆被类型 ESV 没有明显变化;2006—2014 年期间,研究区西北地区的湖面面积萎缩,加上生态环境的恶化,致使 ESV 整体呈现下降趋势。在整个研究时段内。水源涵养和废物处理的贡献率最大,综上分析体现了艾比湖水资源对整个区域生态系统的重要性。

(3)敏感性分析表明,艾比湖湿地自然保护区的 ESV 对 VC 是缺乏弹性的,即使价值系数存在一定的不确定性,但是整个研究区的 ESV 计算仍然是稳定的,证明研究结果是可信的。

(4)研究区生态系统服务价值存在显著的正空间相关性,空间集聚程度高值区主要集中在艾比湖水域,并且高值区有由增加向减少转变的趋势,低值集聚区在湖区四周,并且逐年增加,低高集聚区从 1998—2006 年期间增加明显,2006—2014 年无显著变化,而研究区几乎没有高低集聚区。

(5)影响研究区生态系统服务价值时空变化的驱动力因素主要包括自然因素和人为因素,由于短时间内自然因素对艾比湖湿地自然保护区的影响因素较小,因此人为因素是研究区生态系统服务价值时空变化的主要驱动因素。

参考文献(References):

- [1] Wang H, Zhou S L, Li X B, Liu H H, Chi D K, Xu K K. The influence of climate change and human activities on ecosystem service value. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 224-239.
- [2] 栗晓玲, 康绍忠, 佟铃. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用——以甘肃河西走廊石羊河流域为例. *生态学报*, 2006, 26(6): 2011-2019.
- [3] Li F, Zhang S W, Yang J C, Bu K, Wang Q, Tang J, Cang L P. The effects of population density changes on ecosystem services value: A case study in Western Jilin, China. *Ecological Indicators*, 2016, 61(2): 328-337.
- [4] 李晋昌, 王文丽, 胡光印, 魏振海. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2011, 31(12): 3451-3459.
- [5] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(3): 358-389.
- [6] van den Bergh J C J M, Barendregt A, Gilbert A J. Spatial Ecological-Economic Analysis for Wetland Management: Modelling and Scenario

- Evaluation of Land Use. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 1-254.
- [7] 周葆华, 操璟璟, 朱超平, 金宝石. 安庆沿江湖泊湿地生态系统服务功能价值评估. 地理研究, 2011, 30(12): 2296-2304.
- [8] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: a meta-analysis. Ecological Economics, 2001, 37(2): 257-270.
- [9] Li H J, Li Z H, Li Z H, Yu J, Liu B. Evaluation of ecosystem services: A case study in the middle reach of the Heihe River Basin, Northwest China. Physics and Chemistry of the Earth, Part A/B/C, 2015, 89-90(6): 40-45.
- [10] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. Science of the Total Environment, 2016, 547(1): 137-147.
- [11] Xiao Y, Ouyang Z Y, Xu W H, Xiao Y, Zheng H, Xian C F. Optimizing hotspot areas for ecological planning and management based on biodiversity and ecosystem services. Chinese Geographical Science, 2016, 26(2): 256-269.
- [12] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 生态学杂志, 2004, 23(4): 47-51.
- [13] 王伟, 陆健健. 三垌湿地生态系统服务功能及其价值. 生态学报, 2005, 25(3): 404-407.
- [14] 韩美, 张晓慧. 黄河三角洲湿地主导生态服务功能价值估算. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(6): 37-43.
- [15] 赵欣胜, 崔保山, 杨志峰. 红树林湿地生态效益能值分析——以南沙地区十九涌红树林湿地为案例. 生态学杂志, 2005, 24(7): 841-844.
- [16] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞, 颜耀文. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应——以甘肃省金塔县为例. 水土保持研究, 2012, 19(2): 165-170.
- [17] 万鲁河, 王绍巍, 陈晓红. 基于 GeoDA 的哈大齐工业走廊 GDP 空间关联性. 地理研究, 2011, 30(6): 977-984.
- [18] 喻露露, 张晓祥, 李杨帆, 赵杏杏, 马生全, Cao H H, 曹均阔. 海口市海岸带生态系统服务及其时空变异. 生态学报, 2016, 36(8): 2431-2441.
- [19] 张雪妮, 吕光辉, 贡璐, 秦璐, 李尝君, 孙景鑫, 任曼丽. 新疆艾比湖湿地自然保护区不同土壤类型无机碳分布特征. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1084-1090.
- [20] 王爽, 丁建丽, 王璐, 牛增懿. 基于遥感的艾比湖流域近 20 年生态服务价值对土地利用变化的响应. 水土保持研究, 2014, 21(5): 144-149.
- [21] 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, 37(5): 728-735.
- [22] 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.
- [23] Costanza R, d'Arger R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [24] 许英勤, 吴世新, 刘朝霞, 阎新华, 马依尔. 塔里木河下游垦区绿洲生态系统服务的价值. 干旱区地理, 2003, 26(3): 208-216.
- [25] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. Science of the Total Environment, 2016, 545-546: 609-620.
- [26] 贺子康, 张永福, 张严俊, 姜洪涛. 艾比湖流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用/土地覆被的响应. 安徽农业科学, 2014, 42(8): 2452-2456.
- [27] Zhang Z M, Gao J F, Gao Y N. The influences of land use changes on the value of ecosystem services in Chaohu Lake Basin, China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 385-395.
- [28] 鲍洪杰, 刘德光. 甘肃省区域经济技术空间差异分析研究——基于 Geoda95i 统计分析. 工业技术经济, 2011, 30(9): 54-59.
- [29] 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.
- [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] 钱亦兵, 吴兆宁, 蒋进, 杨青. 近 50a 艾比湖流域生态环境演变及其影响因素分析. 冰川冻土, 2004, 26(1): 17-26.
- [32] 李磊. 新疆艾比湖湿地自然保护区生态经济价值研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [33] 荆耀栋. 艾比湖干涸湖底沙尘暴形成与运行机制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2007.
- [34] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. 生态学报, 2007, 27(1): 346-356.
- [35] 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.
- [36] 黄云凤, 崔胜辉, 石龙宇. 半城市化地区生态系统服务对土地利用/覆被变化的响应——以厦门市集美区为例. 地理科学进展, 2012, 31(5): 551-560.
- [37] 黄静, 崔胜辉, 李万一, 邱全毅, 马克明. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性. 生态学报, 2011, 31(24): 7441-7449.
- [38] 卜晓燕, 米文宝, 许浩, 董军. 基于多源数据融合的宁夏平原不同湿地类型生态服务功能价值评估. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2016, 42(2): 228-244.
- [39] 孔东升, 张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. 生态学报, 2015, 35(4): 972-983.