基于 CLUE-S 模型的南四湖流域土地利用及其生态效应评估

于 淼[1]，廉丽姝[1,2]，李宝富[1,3]，张文华[1]，初翠翠[1]

（1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院，山东 日照 276826；2. 南四湖湿地生态与环境保护山东省高校重点实验室，山东 日照 276826；3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘　要：[目的] 分析南四湖流域土地利用变化的生态效应并探讨其动态演变特征，为流域土地资源的合理开发利用和生态系统的保护提供参考。[方法] 基于南四湖流域 2000 至 2015 年土地利用数据，利用生态系统服务价值核算模型及 CLUE-S 模型对南四湖流域的生态服务价值及其动态演变特征进行计算和分析。[结果] 2000—2015 年南四湖流域耕地、草地和未利用地面积减少，林地、水域/湿地和城乡建设用地面积增加，南四湖流域整体生态系统服务价值增加了 9.10 亿元，但粮食生产、气体调节和保持土壤等生态功能分别下降了 0.85%，0.85%和 1.29%，生态问题依旧存在，生态系统服务价值分布不均匀，生态减值区的分布范围大于生态增值区。2030 年流域内生态系统服务价值略微增加，而粮食生产、气体调节和保持土壤等单项生态系统服务功能继续下降，生态价值极低区以城市为中心向四周扩张，生态增值区范围缩小。[结论] 虽然研究区内生态系统服务价值呈上升趋势，但生态价值分布不平衡，生态服务功能有升有降，因此有必要制定相应的措施，来控制土地利用类型的转换，平衡流域内的生态环境。

关键词：土地利用变化；生态系统服务价值；CLUE-S 模型；南四湖流域

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2018)06-0231-09　　**中图分类号**：F301.24

文献参数：于淼，廉丽姝，李宝富，等. 基于 CLUE-S 模型的南四湖流域土地利用及其生态效应评估[J]. 水土保持通报，2018，38(6)：231-239. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.036. Yu Miao，Lian Lishu，Li Baofu，et al. Assessment of land use and ecological effects of Nansi Lake basin based on CLUE-S model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(6)：231-239.

Assessment of Land Use and Ecological Effects of Nansi Lake Basin Based on CLUE-S Model

YU Miao[1]，LIAN Lishu[1,2]，LI Baofu[1,3]，ZHANG Wenhua[1]，CHU Cuicui[1]

（1. *College of Geography and Tourism，Qufu Normal University，Rizhao，Shandong* 276826，*China*；2. *Shandong Universities Key Laboratory of Nansi Lake Wetland Ecological and Environmental Protection，Rizhao，Shandong* 276826，*China*；3. *The State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology，Xinjiang Institute of Ecology and Geography，Chinese Academy of Sciences，Urumqi，Xinjiang* 830011，*China*）

Abstract：[Objective] The present study evaluated the ecological effects of land use change and discussed the characteristics of land use dynamic evolution in the Nansi Lake basin in order to provide a reference for rational development and utilization of land resources and protection of ecosystem. [Methods] Based on the land use data of Nansi Lake basin during 2000—2015，we calculated and analyzed the ecosystem service value and its dynamic characteristics using the ecosystem service value accounting model and the CLUE-S model. [Results] From 2000 to 2015，the area of cultivated land，grassland and unused land in the Nansi Lake basin decreased，while the area of woodland，the waters/wetland，and urban-rural construction land increased. The overall ecosystem service value increased by 910 million yuan，but the ecological function of grain production，gas regulation and soil conservation decreased by 0.85%，0.85% and 1.29%，respectively. Ecological

收稿日期：2018-05-18　　**修回日期**：2018-06-25

资助项目：国家自然科学基金青年项目“干旱区山区特殊气候变化对出山口径流的影响：以和田河为例”(41501211)；山东省自然科学基金项目(ZR2015DL001)；教育部人文社会科学基金项目(16YJCZH089)

第一作者：于淼(1992—)，男(汉族)，山东省郓城县，硕士研究生，研究方向为土地利用变化的生态效应。E-mail：qsdyumiao@163.com。

通讯作者：廉丽姝(1963—)，女(汉族)，北京市人，博士，教授，主要从事土地利用变化的区域气候响应研究。E-mail：llsh8210@163.com。

problem still exists in this area, such as uneven distribution of ecosystem service value and the larger area of the ecological impairment areas than the ecological value-added zones. In 2030, the value of ecosystem services in the basin will increase slightly, while the ecological functions such as grain production, gas regulation and conservation of soil will continue to decrease. The area of extremely low ecological value will expand from city-centered to surrounding area, and the ecological value-added zone will reduce. [Conclusion] Although the value of ecosystem services is increasing, the distribution of ecological values is unbalanced, and the function of ecological services is unstable. Therefore, it is necessary to take effective measures to control the conversion of land use types and balance the ecological environment in this basin.

Keywords: land used change; ecosystem services value; CLUE-S model; Nansi Lake basin

生态系统服务是人类从生态系统中获得的各种利益,包括有形和无形两个方面,其中有形是指生态系统为人类提供的物质供给,而无形是指其对人类提供的各种服务[1]。20 世纪 70 年代,生态系统服务开始正式成为一个科学术语被研究者所认可。至 20 世纪 90 年代,生态系统服务有了较为成熟的概念,即"生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用",与此同时生态系统服务价值评估研究也逐步丰富[2]。土地作为陆地生态系统的载体,是人与自然相互作用最密切的地方[3]。土地利用/覆被变化(LUCC)是地球环境变化重要的组成部分和主要原因之一,LUCC 能够影响生物多样性、大气运动、地表径流与侵蚀等许多自然现象和生态过程的变化[4-5],并引起生态系统功能、结构的变化,因此土地对生态服务功能具有基础性的作用[6]。20 世纪 90 年代 Costanza 等[7]从科学意义上明确了生态系统服务价值的计算方法,并测算了不同生态系统的生态服务功能,初步建立了土地利用变化与生态系统服务的联系。Daily[8]对生态系统服务价值的评估纲要进行了详细的描述。同时,中国学者开始对生态系统服务价值进行研究。从空间尺度上来看,相关专家学者从全国、省、市、县(区)等不同尺度对生态系统的服务价值进行了大量研究[9-11],同时也对长江三角洲地区[12]、沿海地区[13]、三江源地区[14]、生态脆弱区等[15]典型地区进行了生态系统服务价值的分析,方法包括生态环境指数法、景观格局指数法和生态服务价值指数法等[16-18]。经过近些年来的发展,中国生态系统服务价值的测算已经基本完备。然而,目前对土地利用生态系统服务价值估算多集中在对过去和现状的评估,对未来土地利用变化的生态效应尚着墨不足。在现有数据的基础上,科学的预测未来土地利用情况,并估算其生态系统服务价值,是一个新的着力点。南四湖是中国华北内陆地区的第一大淡水湖,山东省最大的淡水渔业宝库和重要的水禽栖息地,发挥着南水北调东线工程重要枢纽的作用,对人们的生产、生活有着巨大的影响。然而,随着快速城镇化的推进,南四湖流域的土地利用结构发生了很大变化,造成了该区域生态系统服务价值发生改变,人地矛盾逐渐突出。从土地利用/覆被变化的视角对南四湖流域生态系统的变化进行探究,并通过 CLUE-S 模型对该区域的未来土地利用/覆被状况及其生态效应进行预测和分析,可以丰富生态系统服务价值的理论研究体系,并为南四湖流域土地资源的利用和保护,生态系统的恢复和重建提供必要的参考。

1 研究区概况

南四湖地处山东省的西南部,是淮河流域的重要组成部分,位于 34°27′—35°20′N,116°34′—117°21′E,是山东重要的水源地和生态宝库。湖泊自西北向东南呈条带状延伸,流域面积达 3.17×10^4 km^2,全流域跨山东省、江苏省、河南省和安徽省 4 个省份,地势北高南低,入湖河流呈放射状汇入南四湖。南四湖流域属于暖温带半湿润季风气候区,具有四季分明、雨热同季、光照充足、降水集中和无霜期长的特点,年均气温 13.6 ℃,年均降水量 707.1 mm。流域内城镇化水平低,农业人口占比重较大,且人口分布不均匀,产业结构以第二产业为主,对土地使用的压力较大。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

2000 年土地利用数据由中国科学院资源环境科学数据共享中心(http://www.resdc.cn)获得。数据底片资料来源于 Lantsat 数据、航空照片影像并借助历史资料,在数据融合、增强处理的基础上,进行人机交互式解译和精度验证,使其满足 1∶10 万比例尺的制图精度要求。2015 年南四湖流域土地利用数据以地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)提供的 Landsat 8 影像数据为基础,利用 ENVI 5.1 进行人机交互式解译获得,检验精度>90%,分类标准参考中科院 LUCC 分类标准。在原有数据的基础上,根据需要将其重分类为:耕地、林地、草地、水域/湿

地、城乡建设用地和未利用地共 6 个一级土地利用类型。DEM 数据来自于美国地质勘探局(USGS)提供的亚洲地区 30 s 数字高程数据。各种社会统计数据,由中国统计年鉴和山东省统计年鉴获得。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值评估方法　Costanza 等[7]提出的生态系统服务价值核算模型目前仍然是使用最广泛的生态系统服务价值核算方法。

$$ESV=\sum A_k \cdot VC_K \quad (1)$$

式中:ESV——生态服务价值;A_k——土地利用方式 k 的面积(hm^2);VC_k——该土地利用方式单位面积生态价值系数。

2.2.2 生态系统服务价值系数的修订方法　为了使得生态系统服务价值当量在不同区域具有适宜性,更加准确的估算区域生态系统服务价值,采用了徐丽芬等提出的对土地利用变化较适应,以农田为基准的地区修订方法[19]。

$$\lambda=\frac{Q}{Q_o} \qquad E_k=\lambda \cdot E_{ok} \quad (2)$$

式中:λ——生态服务价值当量的修订系数;Q,Q_o——研究区和全国单位面积粮食产量;E_k——第 k 类土地利用类型修订后的生态服务当量;E_{ok}——第 k 类土地利用类型全国平均生态系统服务价值当量。

2.2.3 敏感性分析　为验证生态价值系数的准确性,用生态价值敏感性指数(CS)反映生态价值系数对生态服务价值的影响程度[20]。

$$CS=\left|\frac{(ESV_j-ESV_i)/ESV_i}{(VC_{jk}-VC_{ik})/VC_{ik}}\right| \quad (3)$$

式中:CS——生态价值敏感性指数;ESV_j——初始生态系统服务价值;ESV_j——调整后生态系统服务价值;VC_{ik}——k 类土地利用类型初始生态服务价值系数;VC_{jk}——k 类土地利用类型调整后生态服务价值系数。若 CS>1,说明 ESV 对于 VC 是有弹性的;反之则 ESV 被认为是缺少弹性的,比值越小说明生态价值系数的准确性越好。

2.2.4 CLUE-S 模型　CLUE-S 模型是由荷兰瓦赫宁根大学的 Verburg 等[21-22]科学家开发的,对中小尺度的区域土地利用变化模拟较为适用的研究模型,具有同时预测和模拟土地利用/土地覆被数量和空间位置变化的能力。它的假设条件是:某地区的土地利用变化是由某种土地利用需求驱动的,而且该地区的土地利用分布格局总是与自然环境、土地需求和社会经济状况保持平衡状态[23]。CLUE-S 模型由土地利用类型转换规则、限制区域、土地需求、空间分配和空间特征 5 部分构成,其中前 4 个为输入模块,核心是空间分配模块。空间分配是在土地利用限制区域、土地利用转换规则、基期土地利用现状和土地利用空间分布概率条件下,按照总概率的大小,通过多次迭代,对土地需求进行空间分配的过程。

$$TPROP_{ik}=P_{ik}+ELAS_k+ITER_k \quad (4)$$

式中:$TPROP_{ik}$——土地利用类型 k 在栅格 i 中出现的总概率;P_{ik}——通过 Logistic 回归得到的空间分布概率;$ELAS_k$——不同土地利用类型的弹性系数;$ITER_k$——土地利用类型 k 的迭代变量。

通过设置转移矩阵来控制各土地利用类型间的转换,取值仅为 0 或 1,0 表示不能转变,1 表示能转变,在自然状态下假定本研究区内各个地类之间都可以相互转化,所以全部设置为 1。转换弹性系数用 0~1 之间的数值来表示,越靠近 0 表明发生转移的可能性越大,反之越小。参考前人的研究成果结合研究区内的情况[24-25],将弹性系数设定为:耕地 0.6;林地 0.8;草地 0.7;水域/湿地 0.9;城乡建设用地 1.0;未利用地 0.3。土地需求量是根据 2000—2015 年各种地类的增长率,采用 Markov 模型获得的。空间特征是通过 Logistic 模型计算各地类出现在每个栅格中的概率,用于解释驱动因素和各地类之间的关系,并用 Pontius 等[26]提出的 relative operating characteristic(ROC)方法对结果进行检验。

2.2.5 Kappa 检验　Kappa 指数能够定量的反映模拟精度,本文运用 Kappa 指数对模拟结果进行检验。其表达式为:

$$Kappa=\frac{(P_o-P_c)}{(P_p-P_c)} \quad (5)$$

式中:P_o——正确模拟的比例;P_c——随机情况下期望的正确模拟比例;P_p——理想分类情况下正确模拟的比值[27]。

3 结果与分析

3.1 南四湖流域土地利用变化特征

总体来看 2000—2015 年间整个流域在研究时间段内耕地、草地和未利用地面积呈现出减少的趋势(图 1),林地、水域/湿地和城乡建设用地面积呈现出增加的趋势,其中增长速度最快的是城乡建设用地。在面积减少的两种用地类型中,草地面积减少的最为迅速。从土地利用转移类型上来看,有 4.53×10^4 hm^2 的耕地被城乡建设用地占用,占城乡建设用地增加面积的 96.84%,可以看出城市的快速扩张的结果是占用了大量的耕地。而从耕地的补充上来看,主要

是对草地的开垦，草地对耕地的补充占到了耕地增加面积的 60.84%。这种城乡建设用地增加占用耕地，从而导致耕地面积减少以及对草地的开发破坏对环境会产生很大的不利影响。为了研究流域内的区域性差异，依据行政区的划分将流域划分为菏泽、济宁、枣庄和徐州市 4 个区域。分区域来看，济宁和徐州的增减趋势与整个流域相似。济宁地区耕地面积在增加，林地和草地在减少，这与其对采煤用地的治理，以及农用地整理复垦政策有关。受经济发展模式的影响，菏泽区域耕地、林地和草地面积快速减少，城乡建设用地迅速增加。整个流域的土地利用类型变化从空间上看，大致呈现出东西两侧剧烈、中间稳定的态势。变化最剧烈的地区集中在流域的最东侧，流域西侧次之，而流域的中间地区相对稳定。分区域来看菏泽、济宁和枣庄 3 个区域变化比较剧烈，而徐州区域相对稳定。城乡建设用地扩张占用耕地的情况在每个城市周围都有所表现，尤其枣庄区域西侧表现的尤为剧烈。该地区西与南四湖水面相邻，生活环境条件舒适；南与江苏接壤，且是铁路京沪线穿过的地方，交通条件便利；同时靠近市中心，经济条件发达。所以在城市化的推动下，使得大量的耕地被城乡建设用地所占用。菏泽和济宁区域耕地转为城乡建设用地的情况次之，这一区域地势平坦、靠近市中心，且有多条铁路线穿过，交通便利，也使得大量的耕地资源被城乡建设用地占用。但是对于耕地的补充却不多，在整个流域内只有零星的分布。

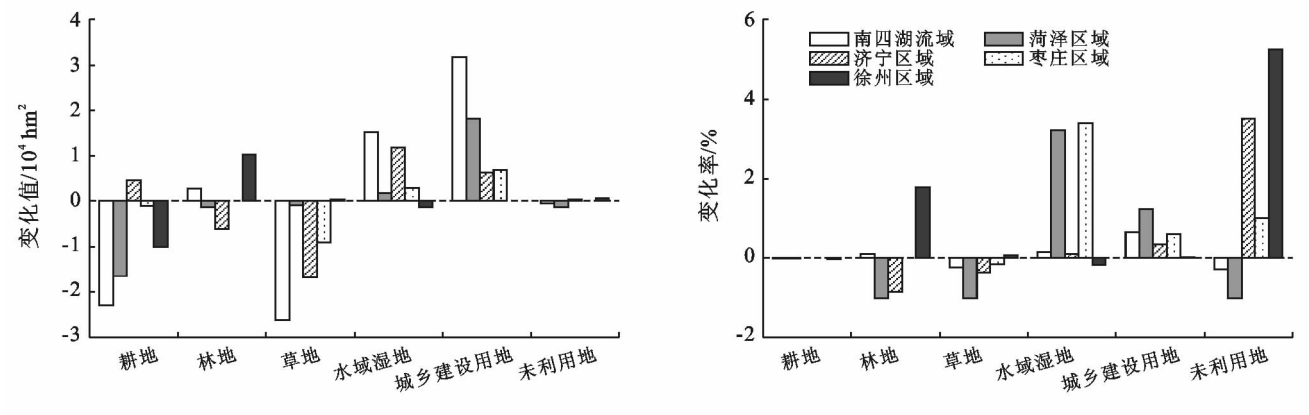


图 1 南四湖流域 2000—2015 年土地利用类型变化情况

3.2 未来土地利用变化模拟

考虑到研究区的实际情况和数据的可获得性，选取到城市中心的距离、河流的距离、铁路的距离以及 DEM 值、坡向和坡度 6 种驱动因素进入回归模型，对 Logistic 回归结果分析，各种地类的 ROC 值均大于 0.7，所选的驱动因子有较好的解释能力。以 2000 年土地利用数据为基期，将驱动因子放入 CLUE-S 模型，模拟 2015 年南四湖流域土地利用现状，并与反演的 2015 年土地利用现状数据进行 Kappa 系数检验，得到 Kappa 指数为 92%，远大于 0.7，具有高度的一致性，表明 CLUE-S 模型在南四湖流域有很好的适用性。假设 2015—2030 年各土地利用类型变化受政策影响程度较小，且各种影响因素保持在 2000—2015 年的影响水平，在此变化趋势下模拟南四湖流域 2030 年的土地利用状况。

结果显示，2015—2030 年空间变化情况依旧表现出中间稳定、东西两侧剧烈的状态，城乡建设用地以城市为中心进一步扩张，且主要占用的是耕地，尤其是在枣庄区域，在煤炭经济的影响下，表现的更为剧烈(附图 4)。

3.3 土地利用变化的生态效应

本文采用谢高地等人[28]提出的生态系统单位面积生态服务价值当量表，并依据山东省的农田单产进行修正(公式 2)，同时将每一种用地类型与其相似的生态系统逐一进行对应：林地—森林、耕地—农田、草地—草地、水域/湿地—河流/湖泊/湿地、未利用地—荒漠，其中水域/湿地的当量值取自河流/湖泊和湿地的平均值，城乡建设用地的生态系统服务价值当量取值为 0 未在表中列出。因南四湖流域绝大多数区域在山东省境内，所以选用山东省的社会经济数据对单个当量因子的价值进行估计。

在无人力投入的情况下，现有单位面积农田提供粮食经济价值大约是自然生态系统提供的经济价值的 7 倍，根据山东省粮油交易中心的数据，估算山东省 2016 年末粮食的价格约为 2.70 元/kg[28]。据此计算出一个当量因子的价值约为 2 480.06 元/hm²。从而可以得到校正后的研究区单位面积生态系统服务价值表(表 1)。

表 1　南四湖流域生态系统单位面积生态服务价值　　元/(hm^2 · a)

一级类型	二级类型	单位面积生态服务价值				
		耕地	林地	草地	水域/湿地	未利用地
供给服务	粮食生产	2 622.22	865.33	1 127.55	1 180.00	52.44
	原料生产	1 022.66	7 814.20	944.00	786.66	104.89
调节服务	气体调节	1 888.00	11 327.97	3 933.32	3 828.44	157.33
	气候调节	2 543.55	10 672.42	4 090.66	20 479.51	340.89
	水文调节	2 019.11	10 724.86	3 985.77	42 243.90	183.56
	废物处理	3 644.88	4 510.21	3 461.32	38 363.02	681.78
支持服务	保持土壤	3 854.66	10 541.31	5 873.76	3 146.66	445.78
	维持生物多样性	2 674.66	11 826.19	4 903.54	9 335.09	1 048.89
文化服务	提供美学景观	445.78	5 454.21	2 281.33	11 983.53	629.33
合 计		20 715.51	73 736.71	30 601.26	131 346.79	3 644.88

3.3.1　南四湖流域生态系统服务总价值变化　2000—2015 年和模拟的 2015—2030 年流域生态系统服务价值呈现出略微上升的趋势,前后 2 个 15 a 间南四湖流域内总体生态系统服务价值分别增加了 9.10×10^8 元和 7.29×10^8 元。表明人们不再是只注重经济发展,在考虑经济发展的同时,也开始考虑人与自然的协调发展。耕地和草地面积的减少使得区域内生态系统服务价值下降,但水域/湿地和林地面积的增长,加之水域/湿地的生态价值系数较高,弥补了这一部分损失,并使得流域整体生态系统服务价值增加。

土地利用类型的改变有降低(贡献率为负)和提升(贡献率为正)生态系统服务功能的作用(表 2)。2000—2015 年对流域内生态服务价值有提升作用的主要是耕地向草地、林地和水域/湿地的转变,其中耕地转水域/湿地贡献率为 27.75%,提升作用最大,使得流域内生态系统服务价值增加了 2.18×10^9 元。而耕地向城乡建设用地的转化以及林地被开垦为耕地是使流域内生态服务功能降低的主要原因,两者的贡献率达到 −23.13%,共造成流域内的 $1\,814.59\times10^6$ 元的生态系统服务价值损失。2015—2030 年对提高流域内生态系统服务价值作用最大的是耕地转变为水域/湿地,贡献率为 44.26%,而降低流域内生态系统服务价值作用最大的是耕地向城乡建设用地的转变,贡献率为 −18.19%。可见流域内生态系统服务价值的上升,是以牺牲耕地面积为代价。

表 2　南四湖流域土地利用变化类型及其对生态系统的贡献率

2000—2015 年			2015—2030 年		
土地转移类型	ESV 差值/10^6 元	贡献率/%	土地转移类型	ESV 差值/10^6 元	贡献率/%
耕地—林地	1 076.33	13.72	耕地—林地	143.16	3.67
耕地—草地	347.48	4.43	耕地—草地	87.49	2.24
耕地—水域/湿地	2 176.67	27.75	耕地—水域/湿地	1 728.61	44.26
耕地—城乡建设用地	−938.41	−11.96	耕地—城乡建设用地	−710.54	−18.19
耕地—未利用地	−4.69	−0.06	林地—耕地	−3.98	−0.10
林地—耕地	−876.18	−11.17	林地—水域/湿地	10.08	0.26
林地—草地	−189.80	−2.42	草地—耕地	−122.58	−3.14
林地—水域/湿地	10.08	0.13	草地—林地	2.16	0.06
林地—城乡建设用地	−16.59	−0.21	草地—水域/湿地	206.53	5.29
草地—耕地	−587.96	−7.49	草地—城乡建设用地	−371.81	−9.52
草地—林地	155.29	1.98	草地—未利用地	−75.48	−1.93
草地—水域/湿地	244.31	3.11	水域/湿地—耕地	−304.24	−7.79
草地—城乡建设用地	−38.25	−0.49	城乡建设用地—耕地	11.39	0.29
水域/湿地—耕地	−638.90	−8.14	未利用地—水域/湿地	127.70	3.27
水域/湿地—林地	−7.20	−0.09			
水域/湿地—草地	−57.93	−0.74			
水域/湿地—未利用地	−108.55	−1.38			
城乡建设用地—耕地	298.30	3.80			
城乡建设用地—草地	13.01	0.17			
城乡建设用地—水域/湿地	26.27	0.33			
未利用地—耕地	32.62	0.42			

3.3.2 区域及单项生态系统服务价值变化 2000—2015年南四湖流域就单项生态系统服务价值而言，气候调节、水文调节、废物处理和提供美学景观的生态系统服务功能处于增加的趋势，其生态系统服务价值变化率分别为1.62%，4.50%，2.65%和4.07%（表3）。而维持生物多样性、粮食生产、原料生产、气体调节和保持土壤的生态系统服务功能处于下降的趋势，其生态系统服务价值变化率分别为－0.18%，－0.85%，－0.44%，－0.85%和－1.29%。在模拟时间段内各项生态系统服务价值变化趋势与2000—2015年一致，且下降趋势更为剧烈，粮食生产、原料生产、气体调节、保持土壤和维持生物多样性的生态系统服务价值变化率分别为－1.50%，－0.98%，－1.14%，－1.73%和－0.44%。

南四湖流域，水系纵横交错，对周围生态环境的气候调节、水文调节、废物处理以及提供美学景观等方面有着积极的影响。但是城市的建设对耕地资源的占用，对流域的粮食生产、原料生产、保持土壤和维持生物多样性等方面产生了不利的影响，导致其生态系统功能下降。整体来看，南四湖流域内虽然受到城市化进程的影响，耕地和草地面积减少，造成生态功能的损失，但水域/湿地面积较为广阔，同时水域/湿地对生态系统服务功能的影响较大，加之近些年来水域/湿地面积的增加，使得流域内生态系统服务价值呈现出略微上升的趋势。分区域来看，菏泽区域是生态系统功能下降最为严重的区域，2000—2015年除水文调节、废物处理和提供美学景观功能略微上升外，其他各项生态系统服务价值都在降低；而在模拟的2015—2030年菏泽区域每一项生态系统服务价值都在降低。

表3 单项生态系统服务价值功能变化 %

生态系统服务功能		供给服务		调节服务				支持服务		文化服务
		粮食生产	原料生产	气体调节	气候调节	水文调节	废物处理	保持土壤	维持生物多样性	提供美学景观
2000—2015 ESV变化	菏泽	－1.19	－1.92	－1.65	－0.65	0.90	0.01	－1.45	－1.31	0.66
	济宁	0.05	－4.24	－3.29	2.42	5.65	4.94	－2.46	－0.87	3.90
	枣庄	－1.11	－1.46	－2.73	1.98	8.96	5.93	－2.94	－1.51	4.34
	徐州	－1.91	16.32	11.81	5.16	3.31	－2.36	4.50	7.49	12.69
	南四湖	－0.85	－0.44	－0.85	1.62	4.50	2.65	－1.29	－0.18	4.07
2015—2030 ESV变化	菏泽	－0.50	－0.56	－0.78	－1.82	－3.96	－2.24	－0.57	－1.03	－4.92
	济宁	－1.96	0.01	0.34	3.91	6.84	4.63	－1.43	1.36	7.32
	枣庄	－6.83	－5.72	－6.32	－0.75	7.76	2.98	－7.38	－4.99	4.44
	徐州	0.62	－0.26	－0.95	3.00	7.94	5.74	－0.90	0.24	5.57
	南四湖	－1.50	－0.98	－1.14	1.44	4.43	2.42	－1.73	－0.44	4.35

菏泽区域地处山东地区的西南，地势平坦，以平原为主，经济发展依赖第一产业和第二产业，而又缺少对生态环境的治理，加之快速城市化的影响，城区范围逐渐扩张，因此使得各项生态服务功能都在下降。济宁区域包含了整个南四湖，所以在气候调节、水文调节、废物处理和提供美学景观功能方面有着积极的作用。枣庄区域单项生态系统服务功能变化趋势与流域内总体变化趋势类似，但在模拟时间段内，其粮食生产、气体调节和保持土壤的生态功能下降迅速，生态系统服务价值变化速率分别为－6.83%，－6.32%和－7.38%。而水文调节和提供美学景观功能迅速提高，生态系统服务价值变化速率分别达到7.76%和4.44%。造成这种现象的原因是，城市化的快速提升使得城乡建设用地开始快速侵占耕地资源，从而造成粮食生产和保持土壤等生态功能的快速下降。同时枣庄区域的地理位置特殊，靠近南四湖，受南四湖的直接影响较强，加之区域内水域/湿地面积的增加，导致了水文调节和提供美学景观等生态系统单项服务功能的快速提高。徐州区域距城市较远，因此受城市化影响相对较小，同时在南四湖的影响下，气候调节、水文调节、维持生物多样性和提供美学景观的生态功能提高，使得区域内整体生态系统服务价值变化趋势上升。

3.3.3 生态系统服务价值的空间分布 在ArcGIS 10.0软件的支持下，制作生态系统服务价值图谱，并将生态系统服务价值划分为4个等级：极高（9万元/hm^2≤ESV）、高（5万元/hm^2≤ESV＜9万元/hm^2）、低（1万元/hm^2≤ESV＜5万元/hm^2）、极低（ESV＜1万元/hm^2）。

通过（图2）可以看出，3期生态系统服务价值分布特征基本类似，以南四湖为分界线，西侧生态系统服务价值平均较低，东侧生态系统服务价值平均较

高。2000—2030 年生态系统服务价值极低区随着城市化的发展,在城市周围快速扩张,并且有沿铁路线分布的趋势。而生态系统服务价值极高的区域,以南四湖最为典型。

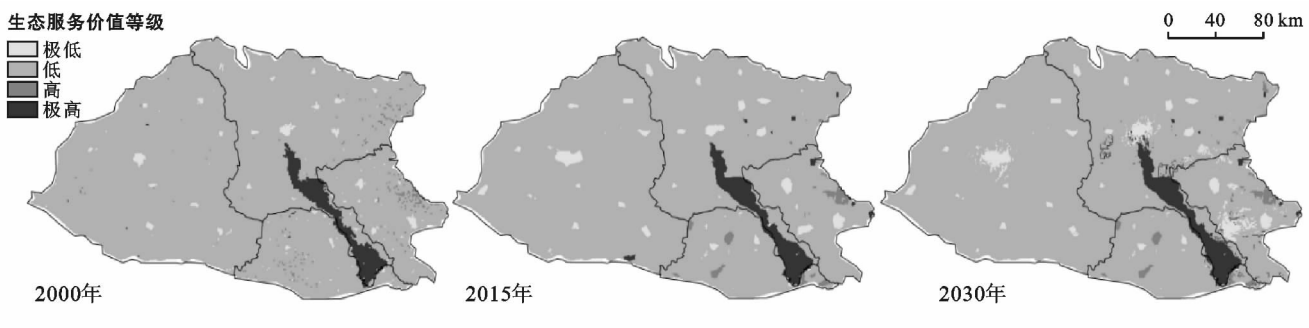


图 2　南四湖流域生态系统服务价值图谱

将两期的土地利用数据进行栅格运算得到生态价值变化图谱[29]。根据生态系统服务价值的变化趋势,生态减值区为生态系统服务价值降低的区域,反之为增值区,生态服务价值保持不变的区域为生态保值区。从(图 3)可以看出无论是 2000—2015 年还是模拟的 2015—2030 年生态保值区空间范围最大,占据着绝对的优势。生态减值区主要集中在城市周围,这也与城市的快速扩张结果相适应。而生态增值区则大部分分布在南四湖流域的东侧,由于东侧地势较高,开发难度相对较大,加之近些年来“退耕还林”等政策的疏导,使得东侧生态系统环境得以改善。但从流域整体来看生态减值区的面积大于生态增值区面积,且生态减值区分布范围较生态增值区广泛,因此对于生态环境的保护仍然需要积极的政策引导。

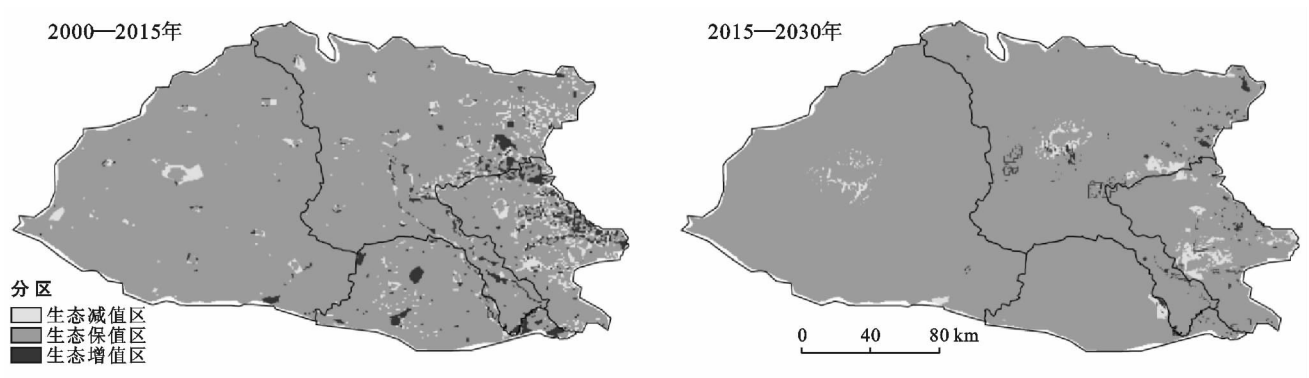


图 3　南四湖流域生态系统服务价值变化图谱

3.4　敏感性分析

根据公式(3),将每种土地利用类型的生态服务价值系数向上调整 50%,进行敏感性指数的计算(表 4)。

由表 4 可知,各年修正后的敏感性指数均小于 1。其中耕地敏感性指数为 0.72～0.75,在所有土地利用类型中最高,表明若耕地的生态系统服务价值系数增加 1%,生态系统服务价值的值将增加0.72%～0.75%。说明南四湖流域内生态服务价值对价值系数是缺乏弹性的,研究结果可信度较高。

表 4　生态系统服务价值敏感性指数

年份	耕地	林地	草地	水域/沼泽	未利用地
2000	0.76	0.02	0.04	0.18	0.00
2015	0.74	0.03	0.03	0.20	0.00
2030	0.73	0.03	0.02	0.22	0.00

4　讨论与结论

(1) 2000—2015 年南四湖流域内耕地、草地和未利用地面积减少,林地、水域/湿地和城乡建设用地面积增加。耕地、草地面积的减少和城乡建设用地面积的增加导致生态系统服务价值下降;而林地和水域/湿地面积的增加,弥补了上述用地类型所造成的损失,使区域内生态系统服务价值呈现出上升的趋势。从土地利用转移的类型来看,城乡建设用地的扩张主要占用的是耕地,而对耕地进行补充的主要是草地,这种城乡建设用地、耕地和草地的耦合关系是造成耕地和草地减少的主要原因。从空间分布上来看,城乡建设用地扩张出现了 3 个热点,分别在菏泽市中心、济宁市中心和枣庄市中心附近,并形成了 3 个生态系统服务价值极低区,这 3 个区域经济与周围相比较都

比较发达，且有铁路穿过、交通状况便利，易于开发利用。而在“退耕还林”等政策的指引下，南四湖流域东部丘陵地带林地和草地数量有了一定的增长，使得这一区域生态环境得以改善，加之南四湖是生态系统服务价值极高区，在流域内以南四湖为分界线，生态系统服务价值表现出东高西低的特点。生态系统服务价值变化趋势显示，生态保值区在南四湖流域占有绝对的数量优势，生态减值区分布较广，且主要集中在城市中心周围，原因是快速的城市化和人口的增长，对这一区域土地的压力较大，使得土地利用类型变化剧烈，导致生态系统服务价值减少。生态增值区在流域东侧相对较为明显，这一区域地势较高，属于丘陵类型，加之政策的引导，使得该区域生态得以改善，生态系统服务价值增高。

(2) 在2000—2015年土地利用变化趋势下，2030年南四湖流域生态系统服务价值仍有7.29×10^6元的小幅度增加。但生态问题不容乐观，与2015年相比粮食生产、原料生产、气体调节、保持土壤和维持生物多样性等单项生态系统服务功能继续下降，生态服务价值极低区以城市为中心继续扩张，生态增值区面积减少，生态减值区面积扩大，生态系统服务价值分布不均衡趋势进一步加强。城乡建设用地的扩张，导致了土地利用结构的变化，进而导致了生态系统服务价值的变化。在城市化、工业化这个不可逆的大背景下，生态环境不可忽视，金山银山不如绿水青山，金山银山就是绿水青山。因此有必要对土地进行整治和土地复垦，使得土地利用集约化。在城乡统筹的方略下，落实土地增减挂钩政策和基本农田政策，严格把控耕地的面积。南四湖发挥着南水北调工程的枢纽作用，生态价值宝贵，是重要的水禽栖息地，而且在水文调节、废物处理和气体调节等生态功能方面，起着举足轻重的作用，因此在城市建设、工业发展过程中必须注意保护生态系统的各项生态功能。

(3) 本文选用基于单位面积价值当量因子的方法估算分析了2000—2015年南四湖流域的生态系统服务价值的变化情况，并利用CLUE-S模型，预测了当前土地利用变化趋势下，2015—2030生态系统服务价值变化情况，旨在预测当前发展形式下的未来流域内的生态系统服务价值的变化趋势。21世纪初期是我国经济飞速发展的时期，同时也带来了许多生态问题，在此发展趋势下对未来生态系统服务价值进行预测，对未来土地资源开发、生态环境保护有一定的借鉴意义，能够避免不良情况的继续发展，对生态环境造成进一步的损害。但地表是人类活动最剧烈的地方，未来土地利用变化趋势的影响因素众多，特别是政策因素直接影响未来土地利用的结构。在政策的基础上模拟和估算多个土地利用目标情景下的生态系统服务价值，并进行比较分析，为决策者提供多目标方案建议，是下一步研究的主要方向。

[参 考 文 献]

[1] 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[J]. 地理科学进展，2014，33(4)：441-446.

[2] 戴君虎，王焕炯，王红丽，等. 生态系统服务价值评估理论框架与生态补偿实践[J]. 地理科学进展，2012，31(7)：963-969.

[3] 杨俊，单灵芝，席建超，等. 南四湖湿地土地利用格局演变与生态效应[J]. 资源科学，2014，36(4)：856-864.

[4] 李志，刘文兆，杨勤科，等. 黄土高塬沟壑区小流域土地利用变化及其生态效应分析[J]. 应用生态学报，2007，18(6)：1299-1304.

[5] 莫宏伟，任志远，李振国. 陕北榆林市土地生态价值及生态风险动态分析[J]. 水土保持通报，2009，29(6)：189-192，197.

[6] 伍星，沈珍瑶，刘瑞民，等. 土地利用变化对长江上游生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报，2009，25(8)：236-241.

[7] Robert Costanze, Ralph d'Arege, Rudolf D G, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.

[8] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.

[9] Song Wei, Deng Xiangzheng, Yuan Yongwei, et al. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain [J]. Ecological Modelling, 2015, 318(318): 245-253.

[10] Wang Meng, Sun Xiaofang. Potential impact of land use change on ecosystem services in China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(248): 1-13.

[11] 莫宏伟，任志远，王秋贤. 风沙过渡区土地利用变化及生态效应图谱：以陕北榆阳区为例[J]. 地理科学，2008，28(6)：770-775.

[12] 刘桂林，张落成，张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报，2014，34(12)：3311-3319.

[13] Du Xingdong, Jin Xiaobin, Yang Xilian, et al. Spatial pattern of land use change and its driving force in Jiangsu Province[J]. International Journal of Environmental Research and Public Heaith, 2014, 11(3): 3125-3231.

[14] 王宗明，张树清，张柏. 土地利用变化对三江平原生态系统服务价值的影响[J]. 中国环境科学，2004，24(1)：126-129.

[15] 刘伟,刘祥宏,但新球,等.生态脆弱区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以贵州北盘江大峡谷国家湿地公园为例[J].草地学报,2015,23(4):689-696.

[16] 侯鹏,王桥,王昌佐,等.流域土地利用/土地覆被变化的生态效应[J].地理研究,2011,30(11):2092-2098.

[17] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

[18] Bian Zhengfu, Lu Qingqing. Ecological effects analysis of land use change in coal mining areabased on ecosystem service valuing: A case study in Jiawang[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,68(6):1619-1630.

[19] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.

[20] 赵国梁,胡业翠.基于 CLUE-S 模型的广西喀斯特山区生态系统服务价值变化研究[J].水土保持研究,2014,21(6):198-203.

[21] Liu Guang, Jin Qingwen, Li Jingyi, et al. Policy factors impact analysis based on remote sensing data and the CLUE-S model in the Lijiang River Basin, China [J]. Catena, 2017,158(11):286-297.

[22] Zhang Liping, Zhang Shiwen, Zhou Zhiming, et al. Spatial distribution prediction and benefits assessment of green manure in the Pinggu District, Beijing, based on the CLUE-S model[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016,15(2):465-474.

[23] 张永民,赵士洞, Verburg P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J].自然资源学报,2003,18(3):310-318.

[24] 郭洪伟,孙小银,廉丽姝,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2016,27(9):2899-2906.

[25] 黄明,张学霞,张建军,等.基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J].资源科学,2012,34(4):769-776.

[26] R Gil Pontius Jr, Laura C. Schneider. land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 85(1/3): 239-248.

[27] R Gil Pontius Jr. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000,66(8):1011-1016.

[28] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[29] 于森,吕晓,廉丽姝,等.江苏省沿海地区土地利用变化及其生态效应[J].水土保持通报,2017,37(3):131-139.

(上接第 223 页)

[18] 丁继新,杨志法,尚彦军,等.降雨型滑坡时空预报新方法[J].中国科学(D 辑):地球科学,2006,36(6):579-586.

[19] 李云君,刘志红,吕远洋,等.四川省滑坡灾害气象预警模型建立与验证[J].地球信息科学学报,2017,19(7):941-949.

[20] Tsai Tunglin. The influence of rainfall pattern on shallow land-slide[J]. Environmental Geology, 2007,53(7):1563-1569.

[21] Lima J L M P de, Singh V P. The influence of rainfall pattern of moving rainstorms on overland flow. [J]. Advances in Water Resources, 2002,25(7):817-828.

(上接第 230 页)

[22] Pautler B G, Sanborn P T, Simpson A J, et al. Molecular characterization of organic matter in Canadian Arctic paleosols for paleoecological applications[J]. Organic Geochemistry, 2013,63(5):122-138.

[23] Carmignato S, Dewulf W, Leach R. Industrial X-ray computed tomography [M]. Cham, Switzerland: Springer, International Publishing, 2018.

[24] FEI, SAS. Avizo9 User's Guide[M]. Berlin, Germany: FEI,2016.

[25] 王玉灵.基于双边滤波的图像处理算法研究[D].陕西西安:西安电子科技大学,2010.

[26] 王浩宇.基于工业 CT 断层切片数据的逆向设计优化技术研究[D].重庆:重庆大学;2016.

[27] 中国国家标准化管理委员会.GB/T21650.1-2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度:第 1 部分(压汞法)[S].北京:中国标准出版社,2008.

[28] 徐芹选,赵景波,祁晓丽.黄土孔隙度及粒度组成关系初探[J].西安工程学院学报,2000,22(1):67-70.