

基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析

吴大千¹, 刘建², 贺同利¹, 王淑军¹, 王仁卿^{1,2*}

(1. 山东大学生命科学院, 济南 250100; 2. 山东大学环境研究院, 济南 250100)

摘要: 综合利用遥感和地理信息系统技术, 对黄河三角洲 1992—2005 年间的土地利用变化进行解译判读, 构建区域生态系统服务价值评价模型, 对生态系统服务价值进行系统核算, 量化土地利用变化对黄河三角洲生态系统服务价值的影响。结果表明: 黄河三角洲区域生态系统服务价值在 1992、1996、2001 和 2005 年分别为 48.75×10^8 、 49.75×10^8 、 58.18×10^8 和 49.22×10^8 元。滩涂地、灌草地和水域是生态系统服务价值构成中贡献最大的 3 种土地利用类型, 占到总生态系统服务价值的 80% 以上。利用马尔柯夫过程对 2010 年的土地利用构成和生态系统服务价值进行预测, 2010 年区域生态系统服务价值将减少为 47.77×10^8 元。如果考虑海岸线蚀退的趋势, 区域生态系统服务价值将会进一步减少。

关键词: 生态系统服务价值, 土地利用, 环境工程, 马尔柯夫过程, 黄河三角洲

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.046

中图分类号: F301.2, P964

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0256-06

吴大千, 刘建, 贺同利, 等. 基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 256—261.

Wu Daqian, Liu Jian, He Tongli, et al. Profit and loss analysis on ecosystem services value based on land use change in Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 256—261. (in Chinese with English abstract)

0 引言

生态系统服务价值是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接提供的生命支持产品(如原材料和食物等)和服务(如栖息地提供等), 包括人类生活所必需的生态产品和保证人类生活质量的生态功能两部分^[1]。长期以来, 由于对生态系统服务价值缺乏充分的认识, 人们较多地考虑环境与资源可实现的直观经济价值, 较少顾及其潜在的社会与环境价值, 对生态系统服务造成了较大的损害, 大大减少了人类的应得福利, 进而影响人类在整个生物圈中的可持续性^[1]。近年来, 国内外众多学者已重视并开展了对全球尺度、国家尺度、区域尺度、以及单个生态系统和生态系统单项服务的价值评估研究^[1-9]。生态系统服务价值的定量评估已成为国际可持续发展科学研究的热点, 是当前生态学、资源经济学和环境经济学的前沿交叉领域。

土地利用/覆盖变化是人类活动与自然环境相互作用的集中体现, 在全球环境变化和可持续发展研究中占有重要的地位^[10]。土地利用/覆盖变化在改变地表自然景观面貌的同时引起了生态系统功能和结构的改变, 其变化过程对生态系统服务功能的维持起到决定性的作用。对

生态系统服务价值进行系统核算, 量化土地利用结构对生态系统服务价值的影响, 将生态系统服务价值核算引入到土地利用决策当中, 可以促进自然资源的合理开发和可持续利用, 推动自然生态系统和社会经济系统长期协调发展。

黄河三角洲拥有中国东部沿海最年轻的陆地, 有着丰富的油气资源、广阔的陆地和海洋资源以及完备的新生湿地系统^[11-13]。黄河三角洲特有的多种物质交汇、多种动力系统相互作用的复杂生态界面决定了黄河三角洲自然灾害频繁和生态系统脆弱的特点。同时, 区域内石油开采和社会经济发展与生态系统保护矛盾突出, 区域内土地利用/覆盖变化迅速^[11-12, 14]。本文通过遥感与地理信息系统技术对黄河三角洲 1992—2005 年间土地利用状况进行解译, 并定量评价土地利用变化及其引起的区域生态系统服务价值的变化, 并根据已有的土地利用信息对今后的土地利用格局和生态系统服务价值进行预测, 以期为区域土地资源可持续利用和生态环境保护与建设提供决策支持。

1 研究区域概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸, 主要分布于山东省东营市和滨州市境内, 是由古代、近代和现代的 3 个三角洲组成的联合体。其中现代黄河三角洲是 1934 年以来至今仍在继续形成的以渔洼为顶点的扇面, 西起挑河, 南到宋春荣沟。本研究选取的研究区域为现代黄河三角洲区域。研究区属暖温带半湿润大陆性气候, 气候温和, 四季分明, 雨热同季; 光照充足, 热量丰富; 区域内年均温 12°C , 无霜期 200 d 以上, 全年日照时数在 2 700 h 左右, 多年平均降水量在 600 mm 左右, 但降

收稿日期: 2008-11-03 修订日期: 2009-08-17

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2006GG2207002, 2007GG2006004); 山东省环保局科技项目(2006049); 山东省优秀中青年科学家奖励基金(2007BS08022)

作者简介: 吴大千(1983—), 男, 博士, 山东临沂人, 主要从事遥感与地理信息系统在生态学中的应用。济南 山东大学生命科学院, 250100。Email: wudaqian1983@yahoo.com.cn

*通信作者: 王仁卿, 教授, 博士生导师。济南 山东大学生命科学院, 250100。Email: wrq@sdu.edu.cn

水年内分配不均且蒸发量大，多分布于 7—8 月。区域内常有旱、涝、风、雹、黄河凌汛和风暴潮等自然灾害，是风暴潮的多发区。本区属北温带落叶阔叶林带，森林覆盖率约为 4%，自然植被为草甸植被，尤以盐生草甸占显著地位。

2 研究方法

2.1 遥感数据处理与解译

以黄河三角洲地区 1: 50 000 的地形图为几何校正的主控图件，采用控制点校正方式对 3 期 Landsat TM 影像（1992.8.24、1996.9.20 和 2005.7.11）和 1 期 Landsat ETM+ 影像（2001.8.9）进行几何校正，双线性内插法重采样，坐标转换时的精度控制在 0.3 个像元以内。研究区域依据现代黄河三角洲的范围进行划分，内陆边界是以渔洼为顶点的扇面，西起挑河，南到宋春荣沟，而沿海地区则以海岸线作为边界。海岸线的提取参考常军等人的方法^[15]，在采用非监督分类方法对影像进行预分类的基础上，选取训练样区，运用监督分类方法提取水域，以分类后的影像为基础提取一般高潮线作为研究区域的海岸线边界。

在 ERDAS 中，采用最大似然法进行监督分类，结合相近年份土地利用的矢量数据和野外调查的样点，综合考虑遥感影像数据的光谱信息和纹理特征，选择训练样本对模板进行反复的编辑评价。综合考虑国家已有土地利用分类体系以及本次调查需要，土地利用分类体系分为以下 7 类：耕地、林地、灌草地、居民工矿用地、水域、裸地和滩涂地。采用分层随机采样法，结合目视判读的结果、相近时期的土地利用图和地形图，利用误差矩阵方法对以上 4 期土地利用分类结果进行精度检验，4 期土地利用图 Kappa 系数均达到 0.80 以上。

2.2 生态系统服务价值计算模型

研究区土地利用生态系统服务分为气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料和娱乐文化，共 10 类^[1]。研究区生态系统服务价值当量因子则参考谢高地等基于问卷调查的中国生态系统服务价值当量因子表，即不同用地类型单位面积每年的服务价值^[3-4]。同时根据谢高地等对生态服务价值的区域修正系数（山东省为 1.38）^[6]，制定黄河三角洲不同土地利用类型的生态系统服务价值当量因子表，如表 1 所示。

制定黄河三角洲土地利用的生态系统服务价值当量因子表之后，根据式（1）~（3）计算各个土地利用类型的服务价值、各项服务功能的价值和生态系统服务的总价值^[1]。

$$ESV_k = \sum_f A_k \times VC_{kf} \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum_k A_k \times VC_{kf} \quad (2)$$

$$ESV = \sum_k \sum_f A_k \times VC_{kf} \quad (3)$$

式中： ESV_k 、 ESV_f 和 ESV ——分别为第 k 类型的服务价

值、第 f 项服务功能的价值和总服务价值； A_k ——第 k 类型的土地面积； VC_{kf} （value coefficient，价值系数）——第 k 类型第 f 项服务单位面积的服务价值。

表 1 黄河三角洲不同土地利用类型单位面积生态系统服务价值

Table 1 Ecosystem services value unit area with different land use types in the Yellow River Delta

| | 元 · hm ⁻² · a ⁻¹ | | | | | | |
|---------|--|---------|---------|-------|----------|----------|----------|
| | 灌草地 | 林地 | 耕地 | 裸地 | 水域 | 居民工矿用地 | 滩涂地 |
| 气体调节 | 976.9 | 2 625.5 | 610.5 | 0 | 0 | 0 | 1 592.7 |
| 气候调节 | 1 099.3 | 2 198.1 | 1 086.8 | 0 | 561.7 | 0 | 15 130.9 |
| 水源涵养 | 976.9 | 2 442.2 | 732.6 | 36.6 | 24 885.8 | -9 215.6 | 13 715.2 |
| 土壤形成与保护 | 2 381.2 | 3 571.7 | 1 782.8 | 24.4 | 12.1 | 0 | 1 513.1 |
| 废物处理 | 1 599.7 | 1 599.7 | 2 002.7 | 12.1 | 22 199.5 | -3 000.3 | 16 086.6 |
| 生物多样性保护 | 1 331.0 | 2 656.0 | 866.9 | 415.1 | 3 040.6 | 0 | 2 212.2 |
| 食物生产 | 366.4 | 244.3 | 1 221.2 | 12.1 | 122.1 | 0 | 265.5 |
| 原材料 | 61.0 | 1 617.9 | 122.1 | 0 | 12.1 | 0 | 61.9 |
| 娱乐文化 | 48.9 | 805.9 | 12.1 | 12.1 | 5 299.5 | 0 | 6 383.0 |

为衡量不同土地利用变化对区域生态系统服务价值变化的影响，引入贡献率（ S_{kT} ）作为衡量标准，其计算公式为

$$S_{kT} = \frac{|\Delta ESV_{kT}|}{\sum_{k=1}^n |\Delta ESV_{kT}|} \times 100\% \quad (4)$$

式中： S_{kT} ——第 k 类土地利用类型在 T 时间段内发生的变化所产生的生态系统服务价值变化量的绝对值占到所有土地利用类型产生的生态系统服务价值变化的总绝对值的比例； ΔESV_{kT} ——此类型土地在 T 时段内发生的变化引起的生态系统服务价值的变化量。

2.3 马尔柯夫过程预测

目前生态系统服务价值评估多集中于对以往或当前的生态系统服务价值变化的描述，缺乏对未来生态价值变化的直观评估，利用马尔柯夫过程可以有效地预测在保持当前人为影响不变的情况下未来土地利用类型的面积变化。如果转移概率 $P_{ij}(t) = P\{X_t = j | X_{t-1} = i\}$ 与现在所处的时刻 $t-1$ 无关，而只与现在所处的状态 i 有关时，则称马尔柯夫链为平稳马尔柯夫链^[16-17]。在土地利用变化研究中，通常假设土地利用变化满足平稳马尔可夫链，土地利用类型对应着马尔柯夫过程中的“可能状态”，而土地利用类型之间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率，可用转移概率矩阵 P 和初始分布 $S(0)$ 并利用如下公式对土地利用状态进行预测^[16]

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N1} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} P_{ij}(0), \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

平稳马尔柯夫链在时刻 $T+1$ 的状态采用下式计算

$$S(T+1) = S(T)P \quad (6)$$

利用 2001 年和 2005 年的两期土地利用图，通过空

间叠加计算 2001—2005 年间的土地利用转移概率,并以 2005 年的土地利用图为起始状态,预测 2010 年的土地利用结构。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构变化

由表 2 可知,由于黄河来水携带泥沙的年际变化和刁口附近黄河故道以及研究区域东南部海岸线的蚀退的影响,研究区域的总面积也在发生变化,在 1992 年为 253 481.1 hm^2 ,到 1996 年面积减少为 246 475.5 hm^2 ,在 2001 年研究区域出现较大面积的增加,达到 259 069.1 hm^2 ,而到 2005 年则出现一定程度的减少,为 255 085.8 hm^2 。灌草地、耕地和滩涂地是黄河三角洲土地利用类型中分布面积最大的 3 种土地利用类型,三者面积占到研究区域面积的 80%以上,而林地、水域、居民工矿用地和裸地所占的面积则相对较小。1992—2005 年间,在黄河水文变化和人类活动的影响下,黄河三角洲土地利用变化复杂而迅速。1992—1996 年间,由于黄河断流的影响,水资源供需矛盾突出,面积变化最大的土

地利用类型是耕地和灌草地,面积分别减少了 10 976.2 hm^2 和 9 645.6 hm^2 ;与此同时,由于区域经济社会发展迅速,居民工矿用地也出现了较大程度的增长。1996—2001 年间,黄河流域启动统一调水,黄河口地区来水补给力度加大,区域缺水条件得到改善,滩涂地和灌草地面积增大,裸地面积大量减少,农业用地面积也出现了一定程度的增加。另外,为了调节黄河来水季节丰枯和满足不断增长的淡水需求,做到丰蓄枯用,在 1996—2001 年期间,研究区域内加大水库建设力度,导致水域面积出现了较大程度的增加^[12]。2001—2005 年间,由于区域水资源供需矛盾的缓解,区域垦荒力度加大,大面积灌草地转化为农业用地,灌草地面积减少了 19 240.9 hm^2 。而农业用地在若干年开垦之后,因土壤肥力减退和次生盐渍化发生而弃耕,导致裸地面积也出现较大面积增加。由于滩涂养殖的逐步推广和盐田的建设,加之研究区域东南部和刁口故道附近海岸线蚀退(研究区域减少了大约 4 000 hm^2),滩涂地面积减少了 5 635.7 hm^2 。而与此同时,居民工矿用地面积出现了较大面积的增加。

表 2 黄河三角洲土地利用类型面积变化及其变化率

Table 2 Area changes with different land use types and their variation ratio in the Yellow River Delta

| 土地利用类型 | 1992 年 | | 1996 年 | | 2001 年 | | 2005 年 | | 1992—1996 年 | | 1996—2001 年 | | 2001—2005 年 | |
|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| | 面积/ hm^2 | 比例/% | 面积变化/ hm^2 | 贡献率/% | 面积变化/ hm^2 | 贡献率/% | 面积变化/ hm^2 | 贡献率/% |
| 灌草地 | 119 090 | 46.98 | 109 444.4 | 44.40 | 114 200.9 | 44.08 | 94 960 | 37.23 | -9 645.6 | 28.19 | 4 756.5 | 17.61 | -19 240.9 | 32.89 |
| 林地 | 5 923.4 | 2.34 | 6 868.8 | 2.79 | 7 266.4 | 2.80 | 5 469.1 | 2.14 | 945.5 | 2.76 | 397.6 | 1.47 | -1 797.4 | 3.07 |
| 耕地 | 49 271.6 | 19.44 | 38 304.4 | 15.54 | 38 743.7 | 14.95 | 50 544.1 | 19.81 | -10 967.2 | 32.05 | 439.4 | 1.63 | 11 800.3 | 20.17 |
| 裸地 | 6 818.2 | 2.69 | 9 274.1 | 3.76 | 2 068.2 | 0.80 | 8 621.3 | 3.38 | 2 455.9 | 7.18 | -7 205.9 | 26.68 | 6 553.1 | 11.20 |
| 水域 | 12 599.4 | 4.97 | 13 690.4 | 5.55 | 21 134.8 | 8.16 | 16 564.3 | 6.49 | 1 091.0 | 3.19 | 7 444.4 | 27.57 | -4 570.5 | 7.81 |
| 居民工矿用地 | 11 773.7 | 4.64 | 16 469.1 | 6.68 | 18 140 | 7.00 | 27 047.8 | 10.60 | 4 695.4 | 13.72 | 1 670.9 | 6.19 | 8 907.8 | 15.23 |
| 滩涂地 | 48 004.9 | 18.94 | 52 424.4 | 21.27 | 57 515.1 | 22.20 | 51 879.4 | 20.34 | 4 419.5 | 12.91 | 5 090.7 | 18.85 | -5 635.7 | 9.63 |
| 总计 | 253 481.1 | 100 | 246 475.5 | 100 | 259 069.1 | 100 | 255 085.8 | 100 | -7 005.6 | 100 | 12 593.6 | 100 | -3 983.4 | 100 |

3.2 生态系统服务价值变化

由表 3 可知,1992—2005 年间,生态系统服务价值表现出先增加后减少的变化趋势。1992 年,区域内生态系统服务价值总值为 48.75×10^8 元;到 1996 年,生态系统服务价值增加到 49.75×10^8 元;到 2001 年,由于黄河全流域调水调配,黄河来水补给增多,区域水资源矛盾得到缓解,生态系统服务价值出现较大程度增加,达到 58.18×10^8 元;到 2005 年,生态系统服务价值出现了一定程度的下降,下降为 49.22×10^8 元。滩涂地、灌草地和水域是生态系统服务价值构成中贡献最大的 3 种土地利用类型,占到了全部生态系统服务价值的 80%以上。1992—1996 年间,虽然灌草地和耕地面积减少,但是由于滩涂地面积的增加,生态系统服务价值出现了增长,而林地和裸地的变化对生态系统服务价值的影响不大。1996—2001 年间,由于区域水资源条件的改善和水利建设力度的加大,水域和滩涂地的面积增加较多,导致生态系统服务价值大幅度增加。而在 2001—2005 年间,虽然由于人类垦荒规模加大,灌草地大量减少,耕地大量

增加,导致生态系统服务价值减少,但是从贡献率来看,水域和滩涂地的减少仍然是 2001—2005 年间生态系统服务价值减少的最主要因素。

由结果可知,人们长期形成的“开垦—弃耕—荒芜—再开垦”的掠夺式土地利用方式虽然在短时间内扩大了耕地面积,但从长远角度看,将导致灌草地、耕地和裸地间的频繁转换,必将严重损害区域内生态系统服务功能,引起生态系统服务价值的降低。为保持生态系统服务功能的稳定和区域的可持续发展,今后的农业发展应该根据土壤自然条件的差异,因地制宜,分区用地,禁止盲目对荒草地进行垦荒^[11,18]。

由表 4 可知,对于各单项服务,在所研究的 4 个时段,所占比例最大的为废物处理单项,其次为水源涵养单项和气候调节单项,3 个单项约占到全部生态系统服务价值的 60%以上。3 个单项的变化趋势与生态系统服务功能总价值变化趋势相一致,均表现为在 1992—2001 年间逐年增加,而在 2001—2005 年间减少,主要反映了滩涂地和水域这两种土地利用类型的变化特征。滩涂湿地是

黄河三角洲生态系统的功能主体，对于区域生态系统功能有着不可替代的作用，同时也是区域内的生态脆弱区^[13]。因此，必须通过生态工程强化湿地生态系统自身调节能力和平衡作用，减少石油开采和农业活动对滩涂湿地的干扰和破坏。水域面积对区域生态系统服务价值同样有着积极的影响，在区域生态系统服务价值中同样占

有较大的比重。由于盐碱化现象严重，区域内难利用土地面积较大而且脆弱，扩大水域面积必须以治水改碱为主，兴修水利设施，发展上粮下渔、上菜下渔和上果下渔等多种生态高效农业模式，才能实现后备土地资源合理利用与长效开发。

表 3 黄河三角洲 1992—2005 年各土地利用类型生态系统服务价值及其变化

Table 3 Total ecosystem services value and their variation for each land use category in the Yellow River Delta from 1992 to 2005

| 土地利用类型 | 1992 年 | | 1996 年 | | 2001 年 | | 2005 年 | | 1992—1996 年 | | 1996—2001 年 | | 2001—2005 年 | |
|--------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|
| | ESV/(10 ⁴ 元) | 比例/% | ESV 变化/(10 ⁴ 元) | 贡献率/% | ESV 变化/(10 ⁴ 元) | 贡献率/% | ESV 变化/(10 ⁴ 元) | 贡献率/% |
| 灌草地 | 105 243.2 | 21.44 | 96 762.4 | 19.45 | 100 967.8 | 17.35 | 83 956.4 | 17.06 | -8 480.8 | 15.49 | 4 205.3 | 4.68 | -17 011.4 | 15.06 |
| 林地 | 10 596.8 | 2.16 | 12 199.8 | 2.45 | 12 906 | 2.22 | 9 713.7 | 1.97 | 1 603 | 2.93 | 706.2 | 0.79 | -3 192.3 | 2.83 |
| 耕地 | 41 561.2 | 8.47 | 32 690.9 | 6.57 | 32 320.2 | 5.56 | 42 647.7 | 8.66 | -8 870.3 | 16.20 | -370.7 | 0.41 | 10 327.5 | 9.14 |
| 裸地 | 352.4 | 0.07 | 475.3 | 0.10 | 106 | 0.02 | 441.9 | 0.09 | 122.9 | 0.22 | -369.3 | -0.41 | 335.9 | 0.30 |
| 水域 | 71 302.7 | 14.52 | 76 848.6 | 15.45 | 118 636.8 | 20.39 | 92 980.8 | 18.89 | 5 545.9 | 10.13 | 41 788.2 | 46.50 | -25 656 | 22.72 |
| 居民工矿用地 | -14 382.6 | -2.93 | -20 118.5 | -4.04 | -22 159.6 | -3.81 | -33 041.3 | -6.71 | -7 776.9 | 14.20 | 2041.1 | 2.27 | -12 922.8 | 11.44 |
| 滩涂地 | 276 262.2 | 56.27 | 298 615 | 60.03 | 339 004.6 | 58.27 | 295 510.6 | 60.04 | 22 352.7 | 40.83 | 40 389.6 | 44.94 | -43 494 | 38.51 |
| 总计 | 487 517.6 | 100.0 | 497 473.6 | 100.0 | 581 781.8 | 100.0 | 492 209.9 | 100.0 | 4 496.5 | 100.0 | 88 390.4 | 100.0 | -91 613 | 100.0 |

表 4 黄河三角洲 1992—2005 年单项生态系统服务价值

Table 4 Values for single ecosystem service in the Yellow River Delta from 1992 to 2005

| 服务单项 | 1992 年 | | 1996 年 | | 2001 年 | | 2005 年 | |
|---------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | ESV/(10 ⁴ 元) | 比例/% |
| 气体调节 | 23 842.9 | 4.89 | 23 210.0 | 4.67 | 24 881.5 | 4.28 | 22 061.1 | 4.48 |
| 气候调节 | 93 091.6 | 19.10 | 97 843.2 | 19.67 | 109 552.8 | 18.83 | 96 562.5 | 19.62 |
| 水源涵养 | 103 059.3 | 21.14 | 104 495.1 | 21.01 | 134 789.3 | 23.17 | 101 795.7 | 20.68 |
| 土壤形成与保护 | 46 553.1 | 9.55 | 43 393.1 | 8.72 | 45 653.7 | 7.85 | 41 467.3 | 8.42 |
| 废物处理 | 131 535.2 | 26.98 | 135 659.4 | 27.27 | 164 821.3 | 28.33 | 138 311.4 | 28.10 |
| 生物多样性保护 | 36 429.2 | 7.47 | 35 895.2 | 7.22 | 40 128.8 | 6.90 | 35 344.7 | 7.18 |
| 食物生产 | 11 961.6 | 2.45 | 10 479.3 | 2.11 | 10 880.0 | 1.87 | 11 375.2 | 2.31 |
| 原材料 | 2 599.0 | 0.53 | 2 593.2 | 0.52 | 2 734.1 | 0.47 | 2 422.6 | 0.49 |
| 娱乐文化 | 38 445.8 | 7.89 | 41 864.1 | 8.42 | 50 381.3 | 8.66 | 42 869.3 | 8.71 |
| 总计 | 487 517.6 | 100.00 | 497 473.6 | 100.00 | 581 781.8 | 100.00 | 492 209.9 | 100.00 |

3.3 未来土地利用结构及生态系统服务价值预测

利用马尔可夫过程预测 2010 年研究区域内土地利用结构，并以此计算 2010 年研究区域内生态系统服务价值，如表 5 与表 6 所示。2010 年区域生态系统服务价值进一步减少，减少为 47.77×10⁸ 元，滩涂地、耕地和灌草地仍然是贡献最大的土地利用类型。需要指出的是，预测所得到的生态系统服务价值很有可能是一个偏高的估计。由于黄河口 1996 年北汉后造陆速度变缓，而黄河三角洲东南部附近滩涂地蚀退加快^[12]，在 2001—2005 年间，整个研究区域面积由于海岸线的蚀退减少了约 4 000 hm²，而这部分面积主要是滩涂地。由于缺乏海岸线变化趋势的预测，在进行马尔柯夫过程运算时，假设到 2010 年研究区域的面积是不变的，仍为 2005 年研究区域的面积，因此如果海岸线的动态仍然保持 2001—2005 间的变化趋势，那么到 2010 年研究区域的面积仍然将会减少，滩涂地的面积相对于预测的结果将会进

一步减少，区域的生态系统服务价值仍然会出现一定程度的下降。

表 5 2001—2005 年间土地利用类型转换概率矩阵

Table 5 Transition probabilities matrix of different land use types from 2001 to 2005

| 2001 年 | 2005 年 | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 灌草地 | 林地 | 耕地 | 裸地 | 水域 | 居民工矿用地 | 滩涂地 |
| 灌草地 | 0.570 | 0.011 | 0.189 | 0.051 | 0.039 | 0.097 | 0.043 |
| 林地 | 0.291 | 0.445 | 0.221 | 0.018 | 0.006 | 0.020 | 0 |
| 耕地 | 0.250 | 0.041 | 0.671 | 0.016 | 0.009 | 0.014 | 0 |
| 裸地 | 0.419 | 0.009 | 0.400 | 0.049 | 0.021 | 0.092 | 0.010 |
| 水域 | 0.158 | 0 | 0.009 | 0.025 | 0.304 | 0.134 | 0.369 |
| 居民工矿用地 | 0.122 | 0.006 | 0.244 | 0.055 | 0.032 | 0.456 | 0.085 |
| 滩涂地 | 0.042 | 0 | 0.003 | 0.015 | 0.067 | 0.100 | 0.773 |

表6 2010年预测土地利用结构及生态系统服务价值构成

Table 6 Predicted land use composition and ecosystem services value based on Markov chain process in 2010

| 土地利用类型 | 面积/hm ² | 比例/% | ESV/(10 ⁴ 元) | 比例/% | 服务单项 | ESV/(10 ⁴ 元) | 比例/% |
|--------|--------------------|-------|-------------------------|-------|---------|-------------------------|-------|
| 灌草地 | 80 952.3 | 31.74 | 71 571.9 | 14.98 | 气体调节 | 21 678.6 | 4.54 |
| 林地 | 5 750.6 | 2.25 | 10 213.8 | 2.14 | 气候调节 | 98 123.9 | 20.54 |
| 耕地 | 62 152.2 | 24.37 | 52 442.3 | 10.98 | 水源涵养 | 93 029.8 | 19.47 |
| 裸地 | 8 655.0 | 3.39 | 443.6 | 0.09 | 土壤形成与保护 | 40 491.8 | 8.48 |
| 水域 | 13 830.3 | 5.42 | 77 634.2 | 16.25 | 废物处理 | 133 362.0 | 27.92 |
| 居民工矿用地 | 30 589.5 | 11.21 | -37 367.8 | -7.82 | 生物多样性保护 | 34 013.9 | 7.12 |
| 滩涂地 | 53 155.9 | 21.62 | 302 781.6 | 63.38 | 食物生产 | 12 287.0 | 2.57 |
| | | | | | 原材料 | 2 529.1 | 0.53 |
| | | | | | 娱乐文化 | 42 203.6 | 8.83 |
| 总计 | 255 085.8 | 100.0 | 477 719.6 | 100 | | 477 719.6 | 100 |

4 结 论

应用遥感和地理信息系统技术, 获取区域土地利用格局变化动态, 构建生态系统服务价值评价模型对黄河三角洲生态系统功能价值的动态变化进行计算。结果表明:

1) 1992—2005年间, 黄河三角洲土地利用变化迅速而复杂, 区域水资源条件和人类活动是区域土地利用的最主要驱动要素, 与灌草地、耕地、裸地、水域和滩涂地的状态转换存在着密切的联系。

2) 研究区域内 1992、1996、2001 和 2005 年的生态系统价值分别为 48.75×10^8 、 49.75×10^8 、 58.18×10^8 和 49.22×10^8 元。滩涂地、灌草地和水域是生态系统服务价值构成中贡献最大的 3 种土地利用类型, 而废物处理单项、水源涵养单项和气候调节单项则是生态系统价值构成中最主要的系统服务功能单项。滩涂地和水域面积对区域生态系统服务价值有着积极的影响, 滩涂地和水域面积的变化对整个区域生态系统服务价值的变化起着决定性的作用。

3) 根据马尔柯夫过程对 2010 年黄河三角洲的土地利用结构和生态系统服务价值进行了预测。如果保持 2001—2005 年间的人类影响不变, 2010 年区域生态系统服务价值将减少为 47.77×10^8 元。如果再考虑 2001—2005 年间海岸线蚀退的趋势, 那么区域的生态系统服务价值将会进一步减少。马尔柯夫过程可以有效地预测当前土地利用变化趋势下未来土地利用结构, 是一种非常实用的定量方法。本研究没有考虑生态服务价值评估中的质量因素, 即区域内不同质量的统一生态系统类型的价值差异, 需要在下一步的工作中予以完善。同时, 在下一步的工作中需要考虑生态系统服务价值的空间分布差异。

[参 考 文 献]

- [1] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253—260.
- [2] 段瑞娟, 郝晋珉, 张洁瑕. 北京区位土地利用与生态服务价值变化研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 21—28.

Duan Ruijuan, Hao Jinmin, Zhang Jiexia. Land utilization and changes on eco-service value in different locations in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 21—28. (in Chinese with English abstract)

- [3] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 5—9.
- Xie Gaodi, Lu Chunxia, Cheng Shengkui. Progress in evaluating the global ecosystem services[J]. Resources Science, 2001, 23(6): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
- Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189—196. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨璐, 胡振琪, 李新举, 等. 邹城市矿粮复合区土地利用变化及生态系统服务价值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 70—75.
- Yang Lu, Hu Zhenqi, Li Xinju, et al. Analysis of land use change and ecosystem service value in the overlapped areas of crop and mineral production in Zoucheng City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(12): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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.
- Xie Gaodi, Xiao Yu, Zhen Lin, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 17—22.
- [8] Guo Zhongwei, Xiao Xiangming, Gan Yaling, et al. Ecosystem functions, services and their values: a case study in Xinshang County of China[J]. Ecological Economics, 2001, 38(1): 141—154.
- [9] 周红艺, 熊东红, 杨忠. 元谋干热河谷土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 135—138.
- Zhou Hongyi, Xiong Donghong, Yang Zhong. Effects of land use change on ecosystem service value in Yuanmou dry-hot

- valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 135—138. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—LUCC 的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553—558.
Li Xiubin. A review of the international researches on land use/land cover change[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(6): 553—558. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李静, 赵庚星, 范瑞彬. 黄河三角洲土地利用及土地覆盖变化驱动力分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 117—122.
Li Jing, Zhao Gengxing, Fan Ruibin. Analysis of driving forces of the land use and land cover change at the Yellow River Delta[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition), 2003, 31(3): 117—122. (in Chinese with English abstract)
- [12] 汪小钦, 王钦敏, 励惠国, 等. 黄河三角洲土地利用/覆盖变化驱动力分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 175—181.
Wang Xiaoqin, Wang Qinmin, Li Huiguo, et al. Driving forces of land use change/cover in the Yellow River Delta[J]. Resources Science, 2007, 29(5): 175—181. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王介勇, 赵庚星. 黄河三角洲生态环境脆弱性分析[J]. 国土与自然资源研究, 2005, 3: 53—55.
Wang Jieyong, Zhao Gengxing. Analysis of regional environmental vulnerability in Yellow River Delta[J]. Territory and Natural Resources Study, 2005, 3: 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [14] 叶庆华, 刘高焕, 田国良, 等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(5): 461—474.
- [15] 常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙关系[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 339—346.
Chang Jun, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River Estuary and its relation with runoff and sand-transportation[J]. Geographical Research, 2004, 23(5): 339—346. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 土地利用/景观生态学研究中的马尔可夫链统计性质分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 434—437.
Wu Qiong, Wang Rusong, Li Hongqing, et al. Statistical properties of Markov chain in land use and landscape study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 434—437. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赵庚星, 李强, 李玉环, 等. GIS 支持下的马尔柯夫链模型模拟垦利县土地利用空间格局变化[J]. 山东农业大学学报, 1999, 30(4): 345—349.
Zhao Gengxing, Li Qiang, Li Yuhuan, et al. GIS supported simulation on changes of land use spatial structure of Kenli county using markov chain models[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1999, 30(4): 345—349. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李新举, 方玉东, 田素锋, 等. 黄河三角洲垦利县可持续土地利用障碍因素分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 71—75.
Li Xinju, Fang Yudong, Tian Sufeng, et al. Analysis of obstacle factors to sustainable land use of Kenli County in Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 71—75. (in Chinese with English abstract)

Profit and loss analysis on ecosystem services value based on land use change in Yellow River Delta

Wu Daqian¹, Liu Jian², He Tongli¹, Wang Shujun¹, Wang Renqing^{1,2*}

(1. Colleague of Life Science, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Institute of Environment Research, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: With the aim to investigate variations in ecosystem services in response to land use changes, techniques of remote sensing and geographic information system were integrated into the evaluation model to calculate the ecosystem services value in the Yellow River Delta from 1992 to 2005. The results indicated that the total ecosystem services value in 1992, 1996, 2001 and 2005 were 48.75×10^8 , 49.75×10^8 , 58.18×10^8 and 49.22×10^8 yuan, respectively. Tide land, shrub and grass land, and water body were the land use types that made the greatest contributions to the total ecosystem services value of the study region. The accumulative ecosystem services value of three land use types accounted for over 80% of the total value in the Yellow River Delta, indicating that these land use categories played important and remarkable roles in ecosystem services in the study region. The land use pattern of the Yellow River Delta in 2010 was predicted using the Markov model. The predicted total ecosystem services value in 2010 would reach 47.77×10^8 yuan. The total ecosystem services value might decrease further if the encroachment of coastline was taken into account.

Key words: ecosystem, land use, environment engineering, Markov process, Yellow River Delta