

重点生态功能区生态系统服务价值变化及预测

李 姝¹, 雷晓寒², 陈其兵¹

(1. 四川农业大学 风景园林学院, 四川 成都 611130; 2. 南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: [目的] 对重点生态功能区(都江堰市)生态系统服务价值功能特征和变化趋势进行分析和预测, 为该区域环境保护与合理城市开发目标的制定提供科学依据。[方法] 以都江堰市 1995, 2007, 2014 年 3 期 Landsat 遥感影像解译的土地覆被数据为基础, 使用 Costanza 的生态系统服务价值计算方法, 谢高地 2002 版价值当量, 经当量修正, 敏感度指数检验后, 评估都江堰市 19 a 间生态系统服务价值及其变化。运用灰色 GM(1,1)模型预测其变化趋势。[结果] ① 研究区土地覆被类型以森林、农田为主(共 80% 以上)。1995—2014 年研究区土地覆被变化较大, 生态用地减少。② 1995—2014 年研究区生态系统服务价值下降 629.46 万元。森林是研究区生态服务价值最大的系统(占 83% 以上), 其次为农田、水体、草甸、未利用地。水源涵养、废气处理是都江堰市最突出的两项生态服务(共 56% 以上)。③ 利用灰色 GM(1,1)模型预测了研究区 2021—2035 年土地覆被面积, 结合精度检验预测此阶段生态系统服务价值将增加 136.6 万元, 年均增长 0.17%。[结论] 区域生态系统服务价值减少的主要原因是以交通为代表的建设用地增加, 导致生态服务价值系数较高的生态用地减少, 而增加森林、水体等有较高生态价值的土地覆被类型是维持与提高区域生态功能的有效措施。

关键词: 生态系统服务价值; 重点生态功能区; 灰色预测; 土地覆被; 都江堰市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0225-07

中图分类号: F301.2, F062.2

文献参数: 李姝, 雷晓寒, 陈其兵. 重点生态功能区生态系统服务价值变化及预测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 225-231. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.038; Li Shu, Lei Xiaohan, Chen Qibing. Ecosystem service value change and forecast in key ecological function area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 225-231. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.038

Ecosystem Service Value Change and Its Forecast in Key Ecological Function Area

LI Shu¹, LEI Xiaohan², CHEN Qibing¹

(1. School of Landscape Architecture in Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: [Objective] The functional characteristics of ecological service and the variation trend of key ecological functional areas(Dujiangyan City) were analyzed and predicted to provide a scientific basis for environmental protection and goal determination of rational urban development for this region. [Methods] Based on the land cover data of three Landsat remote sensing images in 1995, 2007 and 2014, calculation method of ecosystem service value from Costanza and the 2002 edition value equivalent method of proposed by Xie Gaodi in 2002 for regional correction, and combining coefficient of sensitivity, we discussed the changes of Dujiangyan's ecosystem service value from 1995 to 2014. Using the Grey Dynamic Model (1,1), the development trend of ecosystem service value in Dujiangyan City were forecast. [Results] ① In the study area, forest and farmland were two main factors, which accounted for more than 80% of the total area. The land cover changed a lot in 1995—2014, and the ecological land reduced. ② The total value of ecosystem services decreased by 629.46 million yuan during 1995—2014 in Dujiangyan City. Forest was the most valuable ecosystem in the area, which accounted for more than 83% of the total value, followed by farmland, water, grass and unused

收稿日期: 2017-05-24

修回日期: 2017-06-21

资助项目: 四川省国际科技合作与交流研究计划“基于 LID 的湿地公园生态修复关键技术引进研究与示范”(2016HH0047)

第一作者: 李姝(1993—), 女(汉族), 四川省都江堰市人, 硕士研究生, 研究区方向为景观生态。E-mail: 183014469@qq.com。

通讯作者: 陈其兵(1963—), 男(汉族), 四川省万源市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事风景园林规划设计方面的工作。E-mail: 310023939@qq.com。

land. Water conservation and waste gas treatment were two most prominent ecological services, which accounted for more than 56% of the ecosystem services in this area. ③ The GM (1,1) predicted the land cover change and ecosystem services value in the study area from 2021—2035. The results suggested that during this period, ecosystem services value will be slowly increased by 136.6 million yuan in the study area, and the average annual growth rate is 0.17%. [Conclusion] The increase of the traffic mainly caused the reduction of the regional ecosystem service value, leading to the decrease of ecological land area. The increase of those land cover types with high ecological values, such as forest and water is an effective measure to maintain and improve regional ecological functions.

Keywords: ecosystem service value; the key ecological function area; grey forecast; land cover; Dujiangyan City

生态系统服务(ecosystem service)是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品与服务,其价值的评估是生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算与生态补偿决算的重要依据与基础^[1-2]。而土地利用类型/土地覆盖变化是全球环境变化的重要组成部分和主要原因之一,对维持生态系统服务功能起着决定性作用^[3]。随着环境问题的日益增多,由土地覆被变化引起的生态系统服务价值的定量评估已成为生态系统可持续性研究的热点。国外对生态系统服务价值的研究自 20 世纪 70 年代开始,以 Constanza, Daily 为代表的学者与相关组织做出许多贡献^[4-8]。20 世纪 90 年代中期至今,国内研究者在生态系统服务价值概念^[2]、评估方法^[9-10]、生态系统服务形成机制^[11]等内容及在世界^[12]、国家^[13-14]、区域^[10,15]、流域^[3,16]、单个生态系统^[13,17]等不同尺度都有过探索。众多研究显示,基于土地覆被变化驱动下对区域生态服务价值的测算有助于认识区域生态系统服务结构、现状及变化,促进区域环境的可持续发展。

重点生态功能区是保障国家生态安全、扩大绿色生态空间的重要区域,其生态功能主要集中在源涵养、水土保持、防风固沙、生物多样性维护 4 种类型^[18]。都江堰市位于青藏高原与四川盆地的过渡地带,是国家重要的“生物多样性基地”,同时也是成都平原重要的水源涵养区,岷江流域与紫坪铺水库的水土保持区。作为第 2 批被选入的国家级生态示范区,其生态系统服务功能变化对区域经济与环境的可持续发展影响深远。本文基于 1995, 2007, 2014 年 3 期遥感影像,在 ENVI, GIS 等空间技术支持下获取土地覆被数据,定量研究都江堰市 19 a 间土地覆被变动对生态系统服务功能的影响,经敏感性指数验证评价结果。最后基于灰色 GM(1,1)模型的预测功能,评估研究区 2021—2035 年的生态系统服务价值。通过以上探索,以期研究成果能为都江堰市生态化建设、土地覆被政策制定、环境保护等工作提供参考与数据支持,促进区域生态环境的可持续发展。

1 研究区概况

都江堰市位于四川省成都市西北部、岷江冲积扇顶,是四川盆地向川西高原的过渡区。研究区是具有重要生态服务功能的“国家级生态示范区”和重要的水源涵养区,其生态环境功能区位十分重要。境内生态景观资源丰富,有青城山、龙池国家森林公园等,旅游业发达。过去近 20 a 中,研究区经过城市扩张,汶川大地震,灾后重建,土地利用随之剧烈变化。都江堰市辖 6 街道, 14 乡镇,总面积 1 208 km²。2014 年全市常住人口 71.63 万人,城市化水平 54.56%,地区总产值 251.58 亿元(旅游收益 91.77 亿元),第三产业产值占比 53.5%。研究区处于岷江冲击平原的顶部,岷江经都江堰水利工程渠首分为岷江正流与 6 条人工开凿的灌溉河,自北向南构成覆盖都江堰灌区的网状水系。研究区跨龙门山南段边缘山地与成都平原西部两种的地形单元,地势从西北高山、中山到东南低山、平原逐步递减,山区、丘陵与平原的面积比例约为 5:2:3。研究区为中亚热带湿润性季风气候,四季分明、阴湿多雨。年均气温 15.1~17.4℃,年均降雨量 843~1 243 mm。日照充足,热量丰富,适宜作物生长。

2 数据与方法

2.1 数据来源

土地覆被类型面积数据由都江堰市 1995, 2007, 2014 年共 3 期 6 景的 Landsat 系列遥感影像解译,影像数据来自美国航空航天局(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)。相关经济数据来自都江堰市统计年鉴与市发展改革局文件。

2.2 研究方法

2.2.1 土地覆被分类与变化分析 景观异质性是土地覆被类型分类的基础,参考常用的土地利用分类系统与相关研究^[19],基于都江堰市土地覆被现状,将研究区土地覆被类型划分为水体、农田、森林、草甸与未利用地、交通运输、居民点及工矿。遥感影像数据处理

基于软件 ENVI 4.7 与 ArcGIS 10.2 平台上,结合实地调查数据目视解译得到景观覆被类型面积(表 4)。运用单一土地利用类型动态指标来定量描述研究期内土地覆被变化的幅度与速度^[20-21]。计算公式为:

$$K=\frac{U_a-U_b}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$$
 (1)

式中: U_a ——研究期初; U_b ——研究期末,皆表示某种土地覆被类型的数量; T ——研究期时长。设定为年。

2.2.2 生态系统服务价值核算标准 Costanza^[5]对全球尺度的生态系统服务价值进行估算,谢高地等^[10]在其基础上,结合中国实际建立了中国生态系统单位面积服务价值表。考虑到研究区特点,参考前人对谢高地不同版本价值当量法、价值系数法的研究^[3,9,22],本文选用谢高地等^[10]2002 版价值当量法计算。

考虑生态系统服务价值动态变化的时间性,借鉴对区域当量修订的研究^[1,6-7],结合研究区实际,对不

同生态系统价值当量因子进行修正。将都江堰市相应年份农田粮食单位面积产量与全国农田粮食单位面积产量的比值作为逐年修订系数(公式 2),求得 1995,2007,2014 年的修订系数分别为 1.39,1.30,1.25。据此将谢高地等制定的“中国生态系统单位面积生态服务价值^[10]”修订为“都江堰市生态系统单位面积生态服务价值”(表 1)。取 2014 年都江堰市粮食最低收购价格 2.76 元/kg 为计价标准,因没有人力投入的生态系统能够提供的经济价值是现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的 1/7^[23],可得研究区 1 个当量因子的经济价值为 2 466.26 元/hm²。单位面积生态服务价值系数(V_c)由单位当量价值与当量相乘。

$$E_i=\frac{Q}{Q_0}E_{0i}$$
 (2)

式中: E_i ——修正后当量。

表 1 1995—2014 年都江堰市生态系统单位面积生态服务价值

生态系统服务类型	年 份	气候调节	气体调节	水源涵养	土壤形成与保护	废气处理	生物多样性保护	食物生产	原材料	娱乐文化	合计
森林	1995	12 010.69	9 248.48	10 974.86	13 367.13	4 488.59	11 172.16	345.28	8 903.20	4 389.94	74 900.32
	2007	11 221.48	8 656.57	10 259.64	12 503.94	4 192.64	10 456.94	320.61	8 335.96	4 093.99	70 041.78
	2014	10 802.22	8 335.96	9 865.04	12 035.35	4 044.67	10 062.34	320.61	8 015.35	3 946.01	67 427.55
农田	1995	1 726.38	3 058.16	2 047.00	5 006.51	5 623.07	2 441.60	3 428.10	345.28	24.66	23 700.76
	2007	1 603.07	2 860.86	1 923.68	4 685.89	5 253.13	2 268.96	3 206.13	320.61	24.66	22 147.01
	2014	153.74	2 737.55	1 800.37	4 513.26	5 055.83	2 194.97	3 082.83	320.61	24.66	21 333.15
草甸	1995	2 732.55	3 082.83	2 737.55	6 683.56	4 488.59	3 748.72	1 035.83	172.64	147.98	24 835.24
	2007	2 564.91	2 885.52	2 564.91	3 058.16	2 638.90	3 502.09	961.84	172.64	123.31	18 472.29
	2014	2 466.26	2 786.87	2 466.26	6 017.67	4 044.67	3 354.11	937.18	147.98	123.31	22 344.32
水体	1995	0	1 578.41	69 869.15	24.66	62 322.39	8 533.26	345.28	24.66	14 871.55	157 569.35
	2007	0	1 479.76	65 331.23	24.66	58 277.72	7 990.68	320.61	24.66	13 909.71	147 359.04
	2014	0	1 430.43	62 840.30	24.66	56 058.09	7 670.07	320.61	24.66	13 391.79	141 760.63
未利用地	1995	1 381.11	1 553.74	1 430.43	3 403.44	2 268.96	2 466.26	542.58	98.65	98.65	13 243.82
	2007	1 282.46	1 455.09	1 331.78	3 156.81	2 120.98	2 293.62	493.25	73.99	73.99	12 281.97
	2014	1 233.13	1 381.11	1 282.46	3 033.50	2 047.00	2 194.97	468.59	73.99	73.99	11 788.72

2.2.3 生态系统服务价值评估 基于土地覆被面积数据(表 2)、修订后的研究区当量及单位面积生态服务价值(表 1),运用公式(3)计算研究区 1995—2014 年生态系统服务价值及其变化。未利用地赋值为草地与沙漠的平均值,道路运输与居民点及工矿属于建设用地,其生态服务价值为 0^[20,24],故未置于表中。公式如下:

$$ESV=\sum_{i=1}^7(A_i\cdot VC_i)$$
 (3)

式中:ESV——生态系统服务价值; VC_i ——第 i 类土地覆被类型的单位面积生态服务价值; A_i ——第 i 类土地面积。

2.2.4 敏感性指数分析 本文引入经济学弹性系数概念,使用生态价值敏感性指数(coefficient of sensitivity)^[25]来分析生态系统服务价值(ESV)随时间变化对价值系数(VC)的依赖程度,检验 ESV 计算结果的可靠性。生态价值敏感性指数 CS 意为 VC 变动 1%引起 ESV 变化的情况。 $CS<1$ 表明 ESV 对 VC 的弹性弱,ESV 总量变化受该土地覆被类型 VC 影响小,估算的 ESV 总量较稳定。 $CS>1$ 表明 ESV 对 VC 的弹性强,估算的 ESV 总量受该土地覆被类型的 VC 影响大,需要 VC 值更准确。研究中将各土地覆被类型价值系数分别上调与下调 50%,据公式(4)计

算 1995,2007,2014 年生态系统服务价值的敏感性指数。计算公式为:

$$CS=\frac{(ESV_j-ESV_i)/ESV_i}{(VC_{jk}-VC_{ik})/VC_{ik}}$$

(4)

式中: i,j ——调整前后的生态服务价值; k ——用地类型。

2.2.5 对生态服务价值的灰色预测方法 灰色预测模型(gray dynamic model, GM)优点是数据需求少而预测精度高,将原始数据序列经过处理后,转化为动态微分方程来描述原系统的内在特征,建立抽象系统的动态演变预测模型,运算基于 Matlab 软件^[26-27]。采用灰色 GM(1,1)模型预测研究区 2021,2028,2035 年土地覆被面积,评估其生态系统服务价值。预测方程简记为:

$$\hat{x}^1t+1=x^10-\frac{\mu}{\alpha}e^{-\alpha t}+\frac{\mu}{\alpha}$$

(5)

$$\hat{x}^0n=\hat{x}^1n-\hat{x}^1(n-1)$$

(6)

式中: α,μ ——常数。

采用后验差检验方法进行精度检验,后验差比值 C 与小误差频率 P 定义为:

$$C=\frac{S_2}{S_1},p=P\{|\epsilon_k-\bar{\epsilon}|<0.6745S_1\}$$

(7)

式中: S_1 ——原始数据标准差; S_2 ——预测数据标准差; ϵ_k ——预测数据误差; $\bar{\epsilon}$ ——预测误差均值 C 值表预测值与实际值间的离散程度。

表 2 都江堰市土地覆被面积变化

土地覆被 类型	覆被面积/hm ²			1995—2014 年 面积变化/hm ²	占研究区比例/%		
	1995 年	2007 年	2014 年		1995 年	2007 年	2014 年
水体	14.59	20.04	24.44	9.85	1.22	1.67	2.20
农田	315.97	234.44	255.79	−60.18	26.44	19.61	21.40
森林	729.29	772.76	733.90	4.61	61.01	64.64	61.37
交通运输	3.97	7.81	26.61	22.64	0.33	0.65	2.23
居民点及工矿	93.93	144.40	130.48	36.56	7.86	12.08	10.92
草甸	25.07	10.68	21.90	−3.17	2.10	0.89	1.83
未利用地	12.49	5.41	0.79	−11.70	1.05	0.45	0.07

3.1.2 土地覆被动态度 单一动态度值越低,说明转化为其他土地覆被类型的数量越小,在研究期内相对稳定^[3]。

由表 3 知,在动态度降低的未利用地、农田、草甸中,未利用地动态度最低,为−4.93%。说明未利用

3 结果分析

3.1 土地覆被变化

3.1.1 土地覆被面积变化 对分类结果进行精度检验显示,1995,2007,2014 年 3 个时相遥感数据分类后 Kappa 值分别为 0.93,0.93,0.92,而 Kappa 值>0.8 表示模拟效果极好^[28],故本次分类结果(图 1,表 2)满足研究需要。结果(附图 4,表 2)显示,都江堰市土地覆被类型以森林、农田为主,二者占研究区总面积 80%以上,1995—2014 年研究区各类用地面积发生明显变化,生态用地减少。2014 年各用地类型面积大小依次为:森林>农田>居民点及工矿>交通运输>水体>草甸>未利用地。森林面积为 733.9 hm²,占研究区总面积 61.37%。森林在研究期内呈先增加后减少的状态,但总量稳定增长,总变化率仅为 0.63%,主要因政府造林政策的坚持实行加上农村产业结构调整使部分农田转为苗木林。交通运输增长最多,占总面积比例由 0.33%上升到 2.33%。2007—2014 年内增长了 3.4 倍,总变化率达 570.28%。主要因地震后城市环线道路增多,乡村公路网络越加完善。未利用地面积减少最多,研究期内减少 93.67%,主要因未利用地多为河滩地,而金马河沿岸工厂建设与局部的农田开垦使土地发生转化。区域土地覆被类型变化的特点是城市化进程加快,导致交通运输、居民点及工矿等建设用地大量增多而生态用地减少。

地相对稳定。水体、森林、居民点及工矿、交通运输的动态度出现不同程度增加。其中交通运输最为显著,动态度达 29.97%,说明交通运输变化最为活跃。主要因城市增修环线道路,建设乡村公路,使市域范围内路网密度增加。

表 3 都江堰市 1995—2014 年土地覆被类型变化动态度

%

年份	水体	农田	森林	草甸	未利用地	居民点及工矿	交通
1995—2007	3.08	−2.15	0.50	−4.79	−4.73	4.48	−8.04
2007—2014	4.47	1.30	−0.72	15.07	−12.20	−1.38	34.38
1995—2014	4.20	−1.00	0.03	−0.66	−4.93	2.05	29.97

3.2 生态服务价值动态演变

3.2.1 不同生态系统类型的价值变化 由表 4 可知,1995—2014 年由于城市扩张,以交通运输为代表的建设用地增加而生态用地减少,使总体生态系统服务价值减少 629.46 万元,变化率为-9.65%。其中仅水体的生态服务价值总量增加了 116.57 万元,变化率为 50.71%,年均增长 2.6%。主要因紫坪铺水库建设与水利基础设施建设,使部分农田、森林及居民点及工矿面积向水体转化。降幅最小的为森林,减少 513.9 万元,变化率为-9.41%。主要由于中低山一带的旅游开发、使城市建设增多,加之少量耕地的

开垦使森林向农田、居民点及工矿、水体发生面积转移。降幅最大的是未利用地,呈先减少后增加状态,19 a 间减少 94.37%,减少 15.61 万元。因未利用地较多的转向居民点及工矿、小范围向农田转化。从历年生态系统构成可见,森林为都江堰市生态系统服务价值最大的生态系统,从 1995—2014 年,分别占研究区生态系统服务价值总量的 83.78%,86.55%和 84.01%,但 19 a 间总量减少 9.41%。其次为农田、水体、草甸。未利用地的生态服务价值量最少,1995—2014 年分别占研究区总量的 0.25%,0.11%,0.02%。

表 4 都江堰市 1995—2014 年生态服务价值及其变化

土地覆被类型	单位面积生态价值/ (10 ⁴ ·hm ⁻² ·a ⁻¹)			生态服务价值/ (万元·a ⁻¹)			1995—2014 年价值变化/ 万元	价值变化 率/%
	1995 年	2007 年	2014 年	1995 年	2007 年	2014 年		
水体	15.76	14.74	14.18	229.89	295.31	346.46	116.57	50.71
农田	2.37	2.21	2.13	748.87	519.21	545.68	-203.19	-27.13
森林	7.49	7.00	6.74	5 462.41	5 412.55	4 948.51	-513.90	-9.41
草甸	2.48	1.85	2.23	62.26	19.73	48.93	-13.33	-21.41
未利用地	1.32	1.23	1.18	16.54	6.64	0.93	-15.61	-94.37
合 计	29.42	27.03	26.46	6 519.97	6 253.44	5 890.51	-629.46	-9.65

3.2.2 不同服务功能类型的价值变化 由表 5 可以看出,1995—2014 年各项服务功能的构成比例变化较小,各项生态服务价值下降,生态系统服务价值总量减少 29 595.12 元。其中,水源涵养、废气处理是研究区最突出的 2 项生态服务,共占研究区生态系统服务价值总量的 56.49%~56.50%。其次为:生物多样性保护>土壤形成与保护>娱乐文化>气体调节>气候调节>原材料>食物生产。食物生产比重最小,只有 1.94%。变化最大的是气候调节,19 a 间减少了 17.9%。变化最小的是食物生产,减少了

9.96%,其他功能变化相对接近。1995—2007 年,生态服务功能为下降趋势,减少 23 947.4 元。其中土壤形成与保护的变化率最大,为-17.75%,减少 5 055.84 元。气体调节变化率最小,为-6.39%,减少 1 183.82 元。其他单项功能的减幅都较为平均。2007—2014 年,生态服务价值减量相对下降,只减少 5 647.72 元,相较于 1995—2007 年有所好转。土壤形成与保护功能上升 2 194.98 元,增加 9.37%。降幅最大的是气候调节,减少了 12.1%,减少 2 016.57 元。降幅最小的是废气处理,减少 1.70%,减少 1 233.11 元。

表 5 都江堰市 1995—2014 年不同服务功能的价值变化

生态系统 服务功能	所占比/%			ESV 增量/元			年变化率/%		
	1995 年	2007 年	2014 年	1995—2007 年	2007—2014 年	1995—2014 年	1995—2007 年	2007—2014 年	1995—2014 年
气候调节	6.07	6.17	5.54	-1 178.81	-2 016.57	-3 195.38	-6.60	-12.10	-17.90
气体调节	6.29	6.41	6.30	-1 183.82	-665.88	-1 849.7	-6.39	-3.84	-9.99
水源涵养	29.59	30.12	29.57	-5 647.75	-3 156.81	-8 804.56	-6.49	-3.88	-10.11
土壤形成与保护	9.68	8.67	9.68	-5 055.84	2 194.98	-2 860.86	-17.75	9.37	-10.04
废气处理	26.91	26.82	26.92	-6 708.23	-1 233.11	-7 941.34	-8.47	-1.70	-10.03
生物多样性保护	9.64	9.81	9.63	-1 849.71	-1 035.83	-2 885.54	-6.52	-3.91	-10.17
食物生产	1.94	1.96	1.94	-394.63	-172.62	-567.25	-6.93	-3.26	-9.96
原材料	3.24	3.30	3.24	-616.57	-345.27	-961.84	-6.46	-3.87	-10.08
娱乐文化	6.64	6.74	6.63	-1 307.12	-665.9	-1 973.02	-6.69	-3.65	-10.10
合 计	100	100	100	-23 947.4	-5 647.72	-29 595.12	-8.14	-2.09	-10.06

3.3 敏感性分析

结果(表 6)显示:各类生态系统服务价值的敏感性指数均在合格范围内,表明计算生态系统服务价值(ESV)过程中使用的价值系数(VC)相对准确。其中 ESV 对于 VC 的依赖性从小到大排列依次是:未利用地<草甸<水体<农田<森林。其中森林 C 值较高,为 0.837 8~0.865 5,说明森林 VC 值增加 1%时,引起研究区 ESV 总量增加 0.837 8%~0.865 5%。其原因主要由于研究区森林面积广大,占市域面积 60%左右,同时森林对应的 VC 值也相对较大。但总体表明,研究区 ESV 总量评估采用的 VC 值没有影响 ESV 随时间变化的真实性,其结果可信。

3.4 生态系统服务价值的灰色预测

3.4.1 土地覆被面积预测 预测结果(表 7)表明,

2021—2035 年各生态用地类型面积呈增长状态。未利用地增长最大,达 297.95%。草甸减少了 96%。通过计算后验差比值、小误差频率、相对误差对预测值进行精度检验,当相对误差<0.2^[26],且后验差比值 $C \leq 0.35$,小误差频率 $p \geq 0.95$ 时,模拟结果可用于研究。经检验,水体、农田、森林、草甸、未利用地的 p 值均为 1, C 值分别为 0.020, 0.002, 0.003, 0.124 和 0.070,预测值精度均为较高。表明预测值可信度较高。

表 6 生态系统服务价值敏感性指数

年份	水体	农田	森林	草甸	未利用地
1995	0.035 3	0.114 9	0.837 8	0.009 5	0.002 5
2007	0.047 2	0.083 0	0.865 5	0.003 2	0.001 1
2014	0.058 8	0.092 6	0.840 1	0.008 3	0.000 2

表 7 都江堰市 2021—2035 年不同类型土地面积及生态系统服务价值预测值

土地类型	土地覆被分类面积预测值/hm ²			2021—2035 年 年变化率	生态服务价值/(万元·a ⁻¹)			2021—2035 价值变化/万元
	2021 年	2028 年	2035 年		2021 年	2028 年	2035 年	
水体	34.07	44.65	58.51	71.73	482.98	632.96	829.44	346.46
农田	278.66	303.99	331.62	19.01	594.47	648.51	707.45	112.98
森林	695.87	660.68	627.27	-9.86	4 692.08	4 454.80	4 229.53	-462.55
草甸	0.25	0.06	0.01	-96.00	0.56	0.13	0.02	-0.54
未利用地	39.93	79.66	158.90	297.95	47.07	93.91	187.32	140.25
合 计	1 048.78	1 089.04	1 176.31	12.16	5 817.16	5 830.31	5 953.76	136.60

3.4.2 生态服务价值预测 由预测的土地覆被面积计算同期生态系统服务价值,结果(表 7)显示 2021—2035 年里因生态用地的增加,生态系统服务价值缓慢上升,增加 136.6 万元,增长 2.35%。到 2035 年,各生态系统服务价值从大到小依次为:森林>水体>农田>未利用地>草甸。水体、农田、未利用地的生态服务价值在研究期内有不同程度增加。其中水体增长最多,达 71.73%,总量增加 346.46 万元。森林与草甸逐年降低,草甸减少最多,达 96%,总量减少 0.54 万元。

4 结论与讨论

(1) 都江堰市土地覆被以森林、农田为主(共 80%以上)。1995—2014 年,各类型土地覆被变化较大,生态用地减少 4.96%。森林变化最小,因植树造林政策的坚决实施,19 a 间变化率仅为 0.63%。交通运输变化最大,是最活跃的类型,城市扩张使其占总面积比例由 0.33%上升到 2.33%。生态用地向建设用地的持续转化,说明研究区城市化进程不断推进。

(2) 森林是都江堰市生态系统服务价值最大的

生态系统(占 83%以上),而水源涵养、废气处理是研究区最突出的两项生态服务(共 56%以上)。1995—2014 年,研究区生态系统服务价值下降 629.46 万元,减少了 9.65%。可见,城市生态系统功能的发挥受到区域城市化进程的影响,环境承受着越来越重的压力,说明区域环境保护与土地资源管理存在缺陷。

(3) 2021—2035 年,都江堰市生态系统服务价值将以年均增长 0.17%的速度缓慢上升,总价值将增长 136.6 万元。期间水体、农田、未利用地的生态服务价值有不同程度增加,而森林、草甸逐年降低。结果预示各种生态功能将有所恢复,但有关部门仍需依据生态系统服务现状及今后用地需求来制定适合都江堰市的发展计划,保护生态用地、适当增加城市绿色基础设施,实现城市建设的有序发展。

(4) 城市扩张带来的土地覆被变化无可避免,但都江堰市作为成都平原重要的生态功能区,应更重视生态修复与生态建设,在资源开发利用的同时寻求土地规划与生态管理的协调发展。本文对都江堰市生态系统服务价值的评估与预测,可为区域发展提供决策参考。但因生态系统兼具复杂性与多样性,其价值的评估方法也还有完善的空间,故与实际价值量有一

定差距。今后的研究中可加强生态系统服务功能与生态过程间关系及其驱动因素的探究,以找到生态系统服务功能演化的机理,为政策的制定提供更细致的建议。

[参 考 文 献]

- [1] 严恩萍,林辉,王广兴,等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(20):5962-5973.
- [2] 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(8): 1243-1254.
- [3] 王友生,余新晓,贺康宁,等. 基于土地覆被变化的怀柔水库流域生态服务价值研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):246-251.
- [4] Costanza R, d, Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital (J), Nature, 1997, 5(387):253-206.
- [5] Costanza R D. Introduction special section: From on valuation of ecosystems services the value of ecosystem services [J]. Ecological Value, 1998, 7(4):423-441.
- [6] Daily G, C Natures services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington: Island Press, 1997.
- [7] Trimble S W, Cresson P. Soil erosion rates-myth and reality [J]. Science, 2000, 289(5477):248-250.
- [8] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environment change [J]. Science, 2001, 292(5515):281-284.
- [9] 赵小汎. 土地覆被生态服务价值指标体系评估结果比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):188-195.
- [10] 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.
- [11] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等. 施肥对稻田生态系统气体调节功能及其价值的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4):577-583.
- [12] 赵景柱,徐亚骏,肖寒,等. 基于可持续发展综合国力的生态系统服务评价研究:13个国家生态系统服务价值的测算[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(1):121-127.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张家其,杨贺菲,田亚平,等. 基于生态系统服务功能价值的湖北省恩施地区生态补偿研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):214-219.
- [16] 刘海,殷杰,林苗,等. 基于GIS的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化[J]. 生态学报[J]. 2017, 37(8): 2575-2587.
- [17] 李琳,林慧龙,高雅. 三江源草原生态系统生态服务价值的能值评价[J]. 草业学报, 2016, 25(6):34-41.
- [18] 黄麟,曹巍,吴丹,等. 2000—2010年我国重点生态功能区生态系统变化状况[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2758-2766.
- [19] 朱会义,李秀彬,何书金,等. 环渤海地区土地覆被的时空变化分析[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2):104-110.
- [20] 赵丹,李锋,王如松. 城市土地覆被变化对生态系统服务的影响:以淮北市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2343-2349.
- [21] 郭荣中,杨敏华. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):238-246.
- [22] 普拉提·莫合塔尔,海米提·依米提. 土地覆被变化下的生态系统服务敏感性研究:以克里雅绿洲为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11):1849-1858.
- [23] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等. 城市化对流域生态系统服务价值空间异质性的影响:以南京市九乡河流域为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10):1715-1725.
- [24] 李偲,韩桂红,海米提·依米提,等. 土地覆被变化对喀纳斯自然保护区生态系统服务价值的影响[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(3):123-127.
- [25] 李恒哲,李超,陈召亚,等. 基于分区的环京津土地生态服务价值及灰色预测[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 221-227.
- [26] 司守奎,孙兆亮,孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015:372-382.
- [27] 赵小汎,陈文波,代力民. Markov和灰色模型在土地覆被预测中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2):19-21.
- [28] 赵丹,李锋,王如松. 城市土地覆被变化对生态系统服务的影响:以淮北市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2343-2349.