

城市化背景下重庆市水生态系统服务价值评估及其影响因子分析

邓灵稚¹, 杨振华², 苏维词³

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;

2. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510000; 3. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要:为分析城市化背景下水生态系统服务价值的时序变化特征及其影响因素,在重庆市水生态系统服务价值演变特征的基础上,利用 Person 相关性分析得出主要影响因子,进一步对重庆市 2001—2015 年水生态系统服务价值的主要影响因子进行了回归分析。结果表明:重庆市 15 年来水生态系统服务价值呈波动增长态势,且以水生态产品供给、调蓄和污染物降解的价值量为主,其价值量年均比重达 66.44%;同时水生态调蓄价值量增长了 483.01 亿元,比重增加至 41.06%,成为水生态系统中价值量最大的服务类型,而水生态文化景观价值比重最小,年均增长率仅有 2.36%。另外,重庆市水生态系统服务价值关键影响因子为常住人口数、城市化水平、污水排放量、人均 GDP、植被覆盖率、生态需水量,且与水生态产品供给、水生态调蓄、水生态系统维持、水生态文化景观价值均存在显著正相关(R^2 均值为 0.74),说明各回归模型的拟合度较高,各因子对水生态系统服务的影响显著。上述研究不仅为水生态系统服务价值的影响机制分析奠定了基础,也为区域性水生态系统规划、开发利用与保护提供了决策参考。

关键词:水生态系统; 服务价值; 影响因子; 城市化

中图分类号: X143; TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0208-09

Valuing the Water Ecosystem Service and Analyzing Its Impact Factors in Chongqing City Under the Background of Urbanization

DENG Lingzhi¹, YANG Zhenhua², SU Weici³

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University,

Shanghai 200241, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University,

Guangzhou 510000, China; 3. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to analyze the temporal variation characteristics and influencing factors of water ecosystem service value under the urbanization background, we use Person correlation analysis to obtain the main influencing factors, and further make a regression analysis on the main influencing factors of water ecosystem service on the basis of the evolution characteristics of service value of water ecosystem in Chongqing City from 2001 to 2015. The results showed that the value of water ecosystem services in Chongqing City had the fluctuating growth trend in the past 15 years, and the value of water ecosystem product supply, regulation and pollutant degradation was the main value, accounting for 66.44% of an average annual value; at the same time, the value of water ecological regulation and storage increased by 48.301 billion yuan, the proportion increased to 41.06%; it became the most valuable service type in the water ecosystem, while the value of water ecological cultural was the smallest, with an average annual growth rate of only 2.36%. In addition, the key influencing factors of water ecosystem service value in Chongqing City were the permanent population, urbanization level, sewage discharge, per capita GDP, vegetation coverage, ecological water demand, and there are significant positive correlations with water ecological product supply, water ecological regulation and storage, water ecological maintenance, water ecological cultural service value (the mean R^2 value was 0.74). The results showed that the fitting degree of each regression model was high, and the

influence of each factor on the water ecosystem services was significant. These studies not only lay a foundation for the analysis of the impact mechanism of water ecosystem service value, but also provide the decision-making reference for regional water ecosystem planning, development, utilization and protection.

Keywords: water ecosystem; service value; impact factor; urbanization

水生态系统是支撑整个地球生命动态平衡的系统,也是维持人类生活和生产活动、水生生物群落结构与水生态环境服务功能的基础资源^[1-2],其通过物质循环和能量流动,共同构成具有一定结构和功能的综合体。然而,在城市化进程中社会经济活动对水资源的生态占用逐渐加强,对水循环特征、水环境状况的干预加剧,导致水生态服务功能日益减弱,水生态系统服务的健康问题(产品供给能力下降、支撑作用减弱、调节功能失效、净化作用减弱、美学价值降低)逐渐引起国内外学者的高度关注。

20世纪80年代以来,随着水生态系统服务概念被首次提出^[3],水生态系统服务评价的相关研究就逐渐成为了当代环境经济学、生态经济学以及可持续生态系统研究的前沿领域,国内外学者也对此给予了高度重视,并开展了大量的实践工作:首先从评价对象上看,前人对不同尺度的水生态系统服务,如湿地^[4]、河流^[5]、流域^[6]、城市^[7]等进行了价值评价,揭示了不同类型的水生态系统服务的区域性差异;其次,从评价方法来看,自1997年Costanza等^[8]首次提出了水生态系统服务价值的系统估算方法以后,学者们在此基础上陆续提出了替代成本法、旅行费用法、恢复费用法、影子价格法、直接市场法、条件价值法(CVM)以及环境选择模型(CM)等方法^[9-12],如Houtven等^[13]结合环境建模、专家法和非市场估算法评估了湖泊生态服务价值量;谢高地等^[14]根据我国生态环境现状,对水资源的供给服务计算系数进行了修正,使评价结果更加契合实际。另外,以往研究也从土地利用变化、气候变化、人类活动干预等角度解释了水体服务价值量变化的影响因素^[4,12,14],如Terrado等^[15]基于气候、土地利用变化等数据,利用InVEST模型分析了水资源供给、水电能源开发服务功能对气候变化的响应;Ping等^[16]根据土地利用/覆被变化分析出水生态系统价值量的主要影响因素,揭示各因子对生态系统服务的影响过程;孙泽祥等^[17]通过分析城市化景观扩展过程中对地类面积的占用,得到降低土地利用变化对水生态系统服务价值的影响程度;Sample等^[18]则采用高级筛选方法评估了未来气候变化对水生态系统服务的影响,发现未来气候变化会降低苏格兰地区农业灌溉用水和发电能力。裴厦^[19]、李景保^[20]等则认为旅游、水利工程开发是影响水体环境调节、生物多样性维持的主要因子。

不难发现,国内外学者对水生态系统服务的价值

评估及影响因子都进行了深入的研究,但仍然存在以下两个问题:(1)目前尚无水生态系统服务价值核算的统一标准,导致其评价结果差异明显;(2)对生态系统服务功能影响因素分析局限于气候变化、土地利用变化,忽略了城市化过程中产业结构、人口活动对生态系统服务占用过程,单纯的认为城市化景观扩张是导致生态系统服务价值下降直接因素。基于此,本文在探究重庆市2001—2015年水生态系统服务价值演变特征的基础上,分析重庆市水生态系统服务价值与潜在影响因子的回归特征,得到重庆市水生态系统服务的主要影响因子,并进一步剖析城市化过程对水生态系统服务影响方式,从而为重庆市水生态系统管理对策的制定提供理论依据。

1 研究区概况

重庆市地处中国内陆西南部的长江上游地区,地跨 $105^{\circ}17'—110^{\circ}11'E$, $28^{\circ}10'—32^{\circ}13'N$ 。地势由南北向长江河谷倾斜,地貌以丘陵、山地、峡谷为主,其山地面积占全市总面积的76%,平均海拔为400 m。全市属亚热带季风性湿润气候,年平均气温在 $16\sim 18^{\circ}C$ 。多年平均降雨量达1 000~1 450 mm,降水多集中在5—9月,占全年总降水量的70%左右。在地形和气候双重作用下,市域河流众多,且均属长江水系,全年平均水资源总量在5 000亿 m^3 ,水能资源理论蕴藏量为1 438.28万kw,可开发量750万kw,属于水生态系统服务类型丰富,且水生态系统服务功能相对显著的省份。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究社会经济数据来源于《重庆统计年鉴》(2001—2015年)和《重庆市国民经济和社会发展统计公报》(2001—2015年),生态环境数据来源于《重庆环境状况公报》(2001—2015年),水资源数据来源于《重庆市水资源公报》(2001—2015年),土地利用数据来源于《重庆市国土资源和房屋管理公报》(2001—2015年)以及相关资料整理。

2.2 评价方法

2.2.1 城市化过程对水生态系统服务的影响框架

水生态系统服务是指水域(河流、湖泊、水库等)生态系统为区域社会经济及文化娱乐发展提供的自然资源及效用,换言之,代表城市化过程中区域水生态系统为人类活动(景观扩展、产业结构调整、人口增长或

集聚)提供的各种基础资源与服务。故本文从城市化与水生态系统服务关联性的角度^[5,7,20],分析城市化过程对水生态系统服务的影响方式与过程(图 1)。其中,城市化过程包括城市景观扩展、人口城镇集聚、产业结构演变和生活方式扩展 4 个方面,并通过水循环过程干预、水产品消耗、生态系统胁迫和景观开发等方式对水生态系统服务施加不同程度的影响;水生态系统服务类型则参考 Costanza 等^[8]、Millennium

Ecosystem Assessment(MA)的指标分类方法^[21],将其划分为水文调蓄、产品供应、环境净化与生态调节、生态系统维持、休闲旅游资源开发 5 大类、15 项指标,各类指标服务价值的改变直接体现出城市化过程对生态环境的压力,共同表征城市化过程中人类活动对水生态系统服务的占用途径与关联性。共同表征城市化过程中人类活动对水生态系统服务的占用途径与关联性。

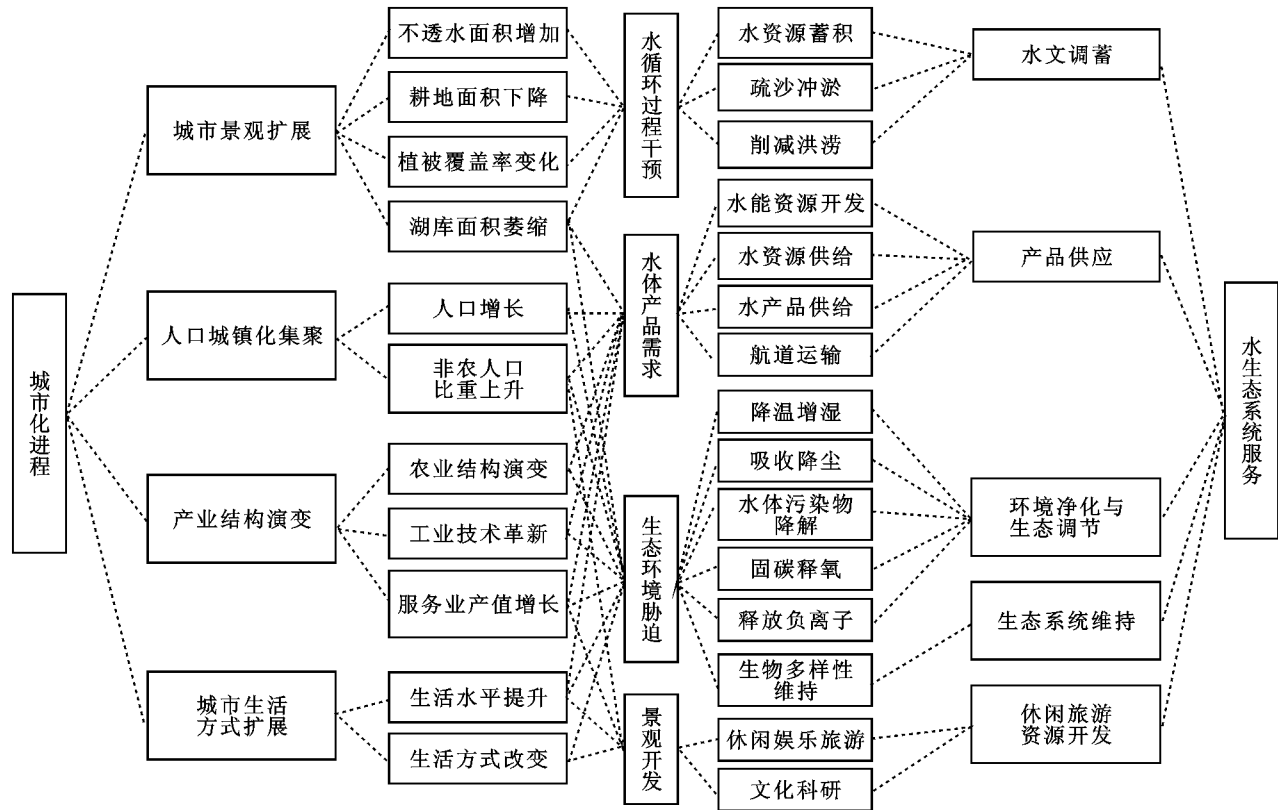


图 1 城市化过程与水生态系统服务功能的影响方式框架

2.2.2 水生态系统服务评价指标 结合城市化过程中水生态系统服务的影响因素(图 1)以及水生态系统服务功能的内涵、机制和效用^[4-5,13,20-21],构建出重庆市水生态系统服务类型及其评价指标体系(表 1)。另外,在核算服务价值时囿于数据的可获取性、可量化性和客观性,本研究对评价指标进行了一定的取舍或替换,使评价结果更加准确、科学。

2.2.3 价值量计算 依据重庆市水生态系统不同评价指标的类型、属性,本文采用市场价值法、替代成本法、旅行收入法、因子参数法、影子价格法、机会成本法等评价方法^[22]对研究区水生态系统服务价值量进行计算,具体见表 2。

3 结果与分析

3.1 水生态系统服务价值变化

为便于比较历年水生态系统服务的变化特征,将

各年度服务的价值当量统一化,并依据水生态系统服务各项指标价值计算公式,得出重庆市 2001—2015 年水生态产品供应、水生态调蓄、水生态环境净化、水生态系统维持和水生态文化景观 5 类服务评价指标的时序演变特征(表 3)。重庆市 15 项水生态系统服务价值中,最大的是水资源供给(C_1),其次为 COD、氨氮降解(C_9)价值,两者历年平均价值量分别为 227.29 亿元和 219.79 亿元,而价值量最小的是固碳释氧(C_{10}),其平均价值量仅有 0.04 亿元,主要因为各指标价值量的计算方法不同,其中水资源供给采用市场价值法,受社会经济发展规模及其用水量总量的影响显著,导致水资源利用量常年维持在 60 亿~80 亿 m^3 ,而固碳释氧价值量则采用的替代工程法,在现有工业技术背景下,人工固碳释氧的成本较低,如工业制氧成本仅 420 元/t,从而导致两者价值量相差悬殊。另外,重庆市水资源供给的历年价值量从 172.98 亿元上升至

233.78 亿元,年均增长率仅 2.25%,其因为水资源供给实物量主要由日益增长的水资源需求量决定,但 2011 年以后水资源利用量持续下降,年均下降率达 2.63%,说明水资源利用与经济发展实现脱钩,水生态系统的指标价值量主要取决于该指标价值的计算方法和社会经济发展对其的占用或消耗程度。

表 1 水生态系统服务价值评价指标体系

服务类型	评价指标	指标释义与物质量核算
水生态产品供应	水资源供给(C ₁)	区域水资源使用量价值,由各部门水资源利用单位价格和用水量计算得到
	水产品供给(C ₂)	水生态系统的生物价值,依据淡水产品供给量计算得到
	水力发电(C ₃)	河道水能资源的利用价值,通过水能资源开发量计算得到
	航道运输(C ₄)	地表径流对航运的价值,由货运和客运价值组成
水生态调蓄	水资源蓄积(C ₅)	地表水资源的蓄积作用,以地表湖库蓄积量为计算依据
	疏沙冲淤(C ₆)	水力作用对河网泥沙的冲刷和搬运作用,以河道清淤的单位成本为计算依据
	滞洪效益(C ₇)	河网连通效应和水库对洪枯水期的调节作用,以蓄水变化量作为滞洪量计算依据
	温湿度调节(C ₈)	水生态系统对地表温度、湿度的调节作用,依据水域面积和指标当量计算得到
水生态环境净化	COD、氨氮降解(C ₉)	水生态系统对 COD、氨氮等主要污染物的降解、转化作用,依据水体的综合纳污能力(效率)得到
	固碳释氧(C ₁₀)	湿地(河、湖、库、沼泽边缘区)泥炭层和水生植物对地表 C 的富集和 O 的释放均具有明显作用
	吸收降尘(C ₁₁)	水环境对地表降尘的吸收,由水域的降尘吸收当量得到
	释放负离子(C ₁₂)	水分子电离过程对地表大气负离子的作用,由典型水域的负离子平均浓度得到
水生态系统维持	生物多样性维持(C ₁₃)	水生态系统对生物多样性(物种、生境、基因)的支撑作用,依据研究参数计算得到
水生态文化景观	休闲娱乐(C ₁₄)	水域景观的休闲、旅游和娱乐作用,依据研究参数计算得到
	文化科研(C ₁₅)	水生态系统是认知自然界物质循环与能量转化的重要媒介,依据研究参数计算得到

表 2 水生态系统服务价值量计算公式

评价指标	公式	参数含义及计算依据
C ₁	$V_1 = \sum_{i=1}^n w_{si} \cdot p_i$	V ₁ 为水资源供给价值;w _{si} 为水质达标前提下“三生”用水量;p _i 为各类用水价格,其中生活、生态单位用水量价格采用重庆市 2001—2015 年第一档生活用水平均单价为 2.7 元/m ³ ,农业、工业、服务业单位用水量价格采用重庆市第一档工业用水单价为 3.25 元/m ³
C ₂	$V_2 = q_t \cdot p_t$	V ₂ 为水产品价值,采用统计年鉴的水产品市场产值;q _t 为水产品产量;p _t 为单位水产品平均价格 11.01 元/kg ^[23]
C ₃	$V_3 = q_{hp} \cdot p_{hp}$	V ₃ 为水能发电价值;q _{hp} 为可开发水能发电量;p _{hp} 为单位水能发电价格,采用一、二、三档电费平均价格 0.82 元/(kW·h)
C ₄	$V_4 = q_{ft} \cdot p_{ft} + q_{pt} \cdot p_{pt}$	V ₄ 为水力航运价值,由货运、客运价值组成;q _{ft} ,q _{pt} 分别为客、货运量;p _{ft} ,p _{pt} 分别为近年来重庆市平均货运单价 33.19 元/t 和客运单价 116.22 元/人 ^[24]
C ₅	$V_5 = q_s \cdot p_s$	V ₅ 为水资源蓄积价值;q _s 指地表湖库水资源蓄积量;p _s 为水量蓄积单位价格,根据《森林生态系统服务评估规范》,采用替代工程法估算出 2014 年水库单位库容造价为 6.11 元/m ³ ^[25]
C ₆	$V_6 = s_{sc} \cdot p_{sc}$	V ₆ 为径流的输沙价值;s _{sc} 为径流的年输沙量;p _{sc} 为行业内单位清淤成本投入 6.5 元/t ^[26]
C ₇	$V_7 = q_l \cdot p_l$	V ₇ 为地表湖库滞留洪峰价值;q _l 为湖泊、水库最高水位与最低水位的调蓄水量变化值;p _l 为单位水量调蓄价值,用近年来水利工程行业单位建设成本替代 ^[25]
C ₈	$V_8 = \frac{q_h \cdot p_h}{\alpha} + \beta \cdot q_w \cdot p_h$	V ₈ 为水资源的温湿度调节价值;q _h ,q _w 分别为水蒸发过程中所吸收的热量和年蒸发量 ^[9,27] ,其数值源于重庆市主要站点的年度蒸发量平均值;p _h 为对应的吸热、蒸发过程中单位耗电量,其价格为重庆市第一档用电均价 0.58 元/(kW·h)。α 和 β 分别指代常规空调效能比平均值(3.25)和单位立方水蒸发耗电量(583 kW·h/m ³)
C ₉	$V_9 = \sum_{i=1}^m e_i \cdot w_s \cdot p_i$	V ₉ 为水生态系统净化主要污染物(COD 和氨氮)的价值;e _i 为水体对第 i 类污染物的平均消纳能力,取蓄水期间(2006—2010 年)的污染物综合衰减系数 ^[28] 。p _i 为第 i 类污染物的单位净化价格(i=1,2…),COD、氨氮参考污水工程中污水处理成本分别为 15 161 元/t 和 24 497 元/t ^[29]
C ₁₀	$V_{10} = B(1.63P_c + 1.19P_o)$	V ₁₀ 为水生态系统生物固碳释氧的价值;B 为水域生物量,由水域面积和单产生生物量(84.96 t/km ²) ^[30] 得到;P _c 为固定 CO ₂ 的单位价值,采用碳税法取值 1 281 元/t ^[31] ,P _o 为释放 O ₂ 的单位价值,取工业制氧成本为 420 元/t ^[32]
C ₁₁	$V_{11} = c_a \cdot s_w \cdot p_a$	V ₁₁ 为水资源吸纳降尘的价值;c _a 为降尘总量;s _w 为区域面积;p _a 为单位降尘价格,参考工业处理标准 0.15 元/kg ^[33]
C ₁₂	$V_{12} = c_d \cdot p_d$	V ₁₂ 为水域产生负离子的价值;c _d 为距离水面高度 1.5 m 处的负离子 ^[34] ,由重庆市典型水面的负离子浓度平均值得到;p _d 为产生单位负离子价格,参考市场负离子发生器效能比为 2.8 元/10 ¹⁰ 个
C ₁₃	$V_{13} = \sum_{i=1}^m \frac{SHDI_i}{SHDI_{max}} \cdot 299837$	V ₁₃ 为生物多样性(生境、物种、基因)维持价值;SHDI _i 为计算得到的分区 i 的生物多样性指数;SHDI _{max} 为区域内生物多样性指数的最大取值,参考 Costanza 等的研究成果,生物多样性指数分区的年生态效益确定为 299 837 元/km ² ^[8]
C ₁₄	$V_{14} = c_t \cdot i_t$	V ₁₄ 为水域景观休闲娱乐价值;c _t 为水域面积;i _t 为 Costanza 等提出的全球水域生态系统单位面积的休闲娱乐价值量,为 881 美元/hm ² (2015 年汇率),折合人民币 6 016.4 元/hm ² ^[8]
C ₁₅	$V_{15} = R \cdot Q$	V ₁₅ 为水域景观的文化教育科研价值;R 为单位面积水域的文化科研价值,取谢高地等计算的中国单位面积水域的平均文化科研价值 3 199.62 元/hm ² ^[14] ;Q 为不同年份的水域面积

表 3 2001—2015 年重庆市水生态服务价值量变化特征

亿元

服务功能价值	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
水资源供给(C ₁)	172.98	181.12	186.31	200.40	211.60	220.27	233.27	250.52	258.39	261.26	260.38	247.88	251.11	240.02	233.78
水产品供给(C ₂)	15.16	17.19	18.33	21.25	23.80	21.86	25.99	21.15	24.27	27.21	34.94	44.99	53.82	64.93	74.91
水力发电(C ₃)	15.40	18.80	22.96	28.03	34.22	40.41	47.72	56.36	66.56	78.60	92.82	114.94	93.48	139.65	113.16
航道运输(C ₄)	30.01	30.11	23.82	24.84	29.07	31.62	35.48	41.48	46.90	50.74	40.05	54.40	61.96	55.13	60.80
水资源蓄积(C ₅)	46.86	67.28	72.78	78.72	101.00	87.39	119.11	130.71	112.05	236.84	234.76	314.43	301.96	370.20	307.47
疏沙冲淤(C ₆)	1.85	1.85	1.85	1.33	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.37	1.06	1.06	1.06	1.01
滞洪效益(C ₇)	18.68	20.42	7.23	5.94	35.45	13.60	53.56	11.60	46.50	124.79	169.21	79.67	236.41	68.23	241.92
温湿度调节(C ₈)	83.50	83.50	83.50	87.44	91.57	95.89	100.41	105.15	110.12	115.31	115.31	115.66	115.51	115.42	115.31
COD、氨氮降解(C ₉)	157.72	258.92	280.21	265.05	241.80	180.40	304.25	255.88	195.18	177.43	196.65	182.24	181.27	245.56	174.32
固碳释氧(C ₁₀)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
吸收降尘(C ₁₁)	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.27	0.27	0.28	0.27	0.29	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29
释放负离子(C ₁₂)	7.26	7.26	7.26	7.60	7.96	8.33	8.72	9.14	9.57	10.02	10.02	10.05	10.02	9.99	10.02
生物多样性维持(C ₁₃)	6.15	6.15	6.19	6.19	6.19	6.19	6.18	6.18	7.27	6.68	6.46	7.06	7.06	7.06	7.06
休闲娱乐(C ₁₄)	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
文化科研(C ₁₅)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07

由水生态系统服务各类价值量的比重变化情况(表 4)可知,全市水生态系统总价值以水生态调蓄和水生态产品供给两类为主,两者历年平均价值量为 614.03 亿元,价值比重为 62.04%,但前者比重从 2001 年的 12.01%逐渐上升至 2015 年的 41.07%,而后的价值比重却呈波动下降的趋势,15 年间所占比重从 42.01%下降至 36.01%。其余 3 类水生态系统价值量均呈波动上升趋势,且增速差异大,其比重却呈明显的波动下降趋势,尤其是水生态环境净化价值,期间价值量共增加 51.24 亿元,比重却从 44.74%下降至 22.38%。另外,除水生态调蓄比重呈上升趋势,其余各类价值量比重均逐步下降,其主要原因在于水生态调蓄中的水资源蓄积、滞洪效益的价值量增长迅速,2001—2015 年两者价值量由 46.86 亿元和 18.68 亿元分别上升

至 307.47 亿元和 241.92 亿元,成为增长率最高的服务类型(表 4)。总体而言,15 年间重庆市水生态服务价值量年均值为 884.87 亿元,且呈逐渐上升趋势,其值从 2001 年的 555.99 亿元上升至 2015 年 1 340.3 亿元,年均增长率达 7.45%,说明社会经济的发展使得水生态系统对人类生产、生活和生态环境的支撑作用不断加强,同时人为干预对水生态系统的影响力也逐渐增大,对水生态系统的占用强度和广度都不断增加。通过服务价值量计算结果可知,随着城市化进程的加快,人类活动向水循环系统索取的资源量增加,对生态系统服务占用程度也逐渐提升,如水生态产品供给、水生态文化景观开发方面,同时,生态系统自身调节能力也不断下降。这些结果共同表明了城市化过程对水生态系统服务影响的差异性。

表 4 2001—2015 年重庆市各类水生态服务功能价值量及其比重变化

年份	水生态产品供应		水生态调蓄		水生态环境净化		水生态系统维持		水生态文化景观		合计/ 亿元
	价值量/亿元	比重/%	价值量/亿元	比重/%	价值量/亿元	比重/%	价值量/亿元	比重/%	价值量/亿元	比重/%	
2001	233.55	42.01	67.39	12.12	248.75	44.74	6.15	1.11	0.14	0.03	555.99
2002	247.22	35.67	89.55	12.92	349.95	50.50	6.15	0.89	0.14	0.02	693.01
2003	251.41	35.37	81.86	11.52	371.24	52.22	6.19	0.87	0.14	0.02	710.84
2004	274.51	37.75	85.98	11.82	360.36	49.55	6.19	0.85	0.15	0.02	727.20
2005	298.68	38.07	137.91	17.58	341.61	43.54	6.19	0.79	0.15	0.02	784.54
2006	314.17	44.38	102.46	14.47	284.93	40.25	6.19	0.87	0.16	0.02	707.90
2007	342.46	36.56	174.12	18.59	413.70	44.17	6.18	0.66	0.17	0.02	936.64
2008	369.50	41.51	143.77	16.15	370.50	41.62	6.18	0.69	0.18	0.02	890.12
2009	396.12	45.08	160.00	18.21	315.18	35.87	7.27	0.83	0.18	0.02	878.76
2010	417.81	38.30	363.09	33.28	303.10	27.78	6.68	0.61	0.19	0.02	1090.87
2011	428.20	36.83	405.34	34.87	322.33	27.73	6.46	0.56	0.19	0.02	1162.52
2012	462.21	39.41	395.17	33.69	308.31	26.29	7.06	0.60	0.19	0.02	1172.94
2013	460.37	35.03	539.44	41.05	307.15	23.37	7.06	0.54	0.19	0.01	1314.20
2014	499.72	37.92	439.49	33.35	371.31	28.18	7.06	0.54	0.19	0.01	1317.77
2015	482.65	36.01	550.40	41.07	300.00	22.38	7.06	0.53	0.19	0.01	1340.30

3.2 影响因素分析

水生态系统服务价值量主要受指标的实物量和价格系数影响。为分析影响水生态系统服务价值量的自然气候与社会经济因素,探究 2001—2015 年重庆市水生态服务的影响因子,结合服务价值与因子之间 Person 相关性研究结果发现(表 5),除水生态环境净化价值与降水量(X_1)、地表径流量(X_3)在 0.01 水平上显著相关外,其他服务类型均与常住人口数(X_4)、城市化水平(X_5)、生态需水量(X_6)、污水排放

量(X_7)、植被覆盖率(X_9)、人均 GDP(X_{10})存在同水平的显著正相关,相关系数均值达 0.87,其显著性系数均小于 0.01,而年均温(X_2)、水质达标率(X_8)对全市水生态系统服务的影响较小,两者相关系数分别为 0.1 和 -0.11。因此,本研究选取常住人口数(X_4)、城市化水平(X_5)、生态需水量(X_6)、污水排放量(X_7)、植被覆盖率(X_9)、人均 GDP(X_{10})为 6 个主要的影响因子对重庆市 2001—2015 年水生态服务价值进行线性回归分析,得到两者的线性拟合特征。

价值量相关性		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
水生态产品供应	Pearson 相关性	-0.06	0.10	0.09	0.91**	0.99**	0.95**	0.87**	-0.20	0.81**	0.96**
	显著性(双侧)	0.84	0.72	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00
水生态调蓄	Pearson 相关性	-0.10	0.20	0.00	0.95**	0.92**	0.95**	0.66**	-0.29	0.81**	0.96**
	显著性(双侧)	0.73	0.47	1.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.29	0.00	0.00
水生态环境净化	Pearson 相关性	0.96**	-0.19	0.97**	-0.23	-0.04	-0.11	0.04	0.30	0.00	-0.15
	显著性(双侧)	0.00	0.50	0.00	0.40	0.89	0.69	0.89	0.28	0.99	0.60
水生态系统维持	Pearson 相关性	-0.21	0.27	-0.11	0.82**	0.82**	0.80**	0.72**	-0.05	0.72**	0.83**
	显著性(双侧)	0.44	0.32	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00
水生态文化景观	Pearson 相关性	-0.12	0.04	0.02	0.82**	0.96**	0.87**	0.94**	-0.23	0.68**	0.89**
	显著性(双侧)	0.67	0.88	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.01	0.00
水生态系统服务	Pearson 相关性	0.08	0.14	0.20	0.93**	0.96**	0.97**	0.75**	-0.22	0.84**	0.97**
	显著性(双侧)	0.77	0.62	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

在自然—社会二元结构的影响下,城市化过程中水生态系统服务的影响因子较多,影响因素相对复杂,分析其影响因素对揭示水生态系统服务的演变过程具有重要意义。总体来看,重庆市水生态系统服务功能持续增强的同时,其社会经济因子的影响力也逐渐增大,而气候变化等自然因子的影响力则下降明显。在快速城市化背景下,各因子对水生态系统服务价值的影响特征如图 2—4 所示。

(1) 人口因子。在城市化过程中,人口激增、非农人口增加必然带来社会经济系统对水资源利用量、水产品需求量、生活污水排放量增加,导致了水生态系统服务的实物利用程度总体提升,从而影响水生态产品供应和水生态系统维持服务价值。从线性回归分析的模型(图 2)上看,2001—2015 年常住人口数从 2 829.21 万人增加至 3 016.55 万人,同时城市化水平也以年均 3.55% 的速率增长,促使水生态产品供应、水生态调蓄、水生态系统维持、水生态文化景观的价值量分别增加 249.13 亿元、483.01 亿元、0.91 亿元和 0.05 亿元,且服务类型的线性回归 R^2 均值为 0.77,尤其是与水生态产品供应、水生态调蓄的 R^2 系数为 0.91、0.82,表明人口的集聚和增长均对水生态产品供应、水生态调蓄具有显著的相关性,而城市化水平与水生态系统维持的相关性显著,其因为城市

化进程直接导致城乡建筑面积(不透水面积)扩展,改变了地表—地下水资源的交换关系,地表水直接汇入河网的速率和数量都得到了较大的提升,同时三峡工程的建设也使得水域面积和水生物数量的增加,最终导致水生态系统维持价值的提升。

(2) 经济与环境因子。GDP 增长是城市化水平提升的核心指标,也是产业集聚—扩展关键驱动因素。产业发展不仅伴随着对生物、景观资源开发程度(工业原材料、产业用水量、旅游开发)的提升,也导致产业排污量、排废量的激增,尤其是废水排放量。表面上促使水体环境对污染物的净化量增加,实则导致水体自净能力下降和生态失衡。也就是说,原始水体积纳的污染物越多,水体消纳污染物的能力就越有限。另外,三峡水利工程的建设虽然降低了市域径流的整体流速,但水量的蓄积也使得重庆市水体对污染物的消纳量增加,人均 GDP、污水排放量与各项水生态系统价值的线性回归系数就是重要证明(图 3),如重庆市人均 GDP 从 5 664 元上升至 52 330 元的过程中,水生态产品供应价值也从 233.55 亿元增加至 482.65 亿元, R^2 系数达 0.926。同时,人均 GDP 与水生态调蓄、水生态文化景观价值也呈显著线性关系,其 R^2 系数均达 0.8 以上,且与水生态产品供应、水生态调蓄的正相关性更强;污水排放量则与水生态文化景观、水生态产品供应价值的线性拟合效果较好,表

明污水排放量的增加直接原因在于用水量的增长,而排放

的污水经治理后又成为景观水体的重要来源。

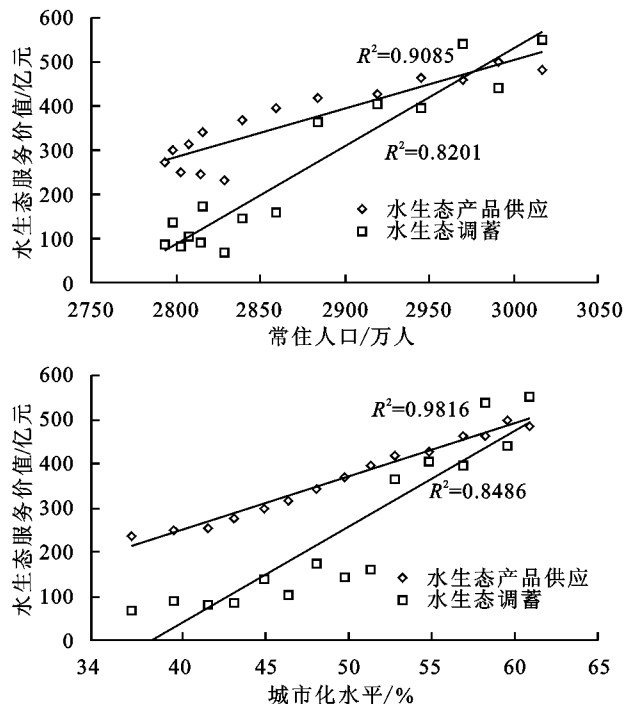


图 2 水生态系统服务价值与人口因子的拟合度

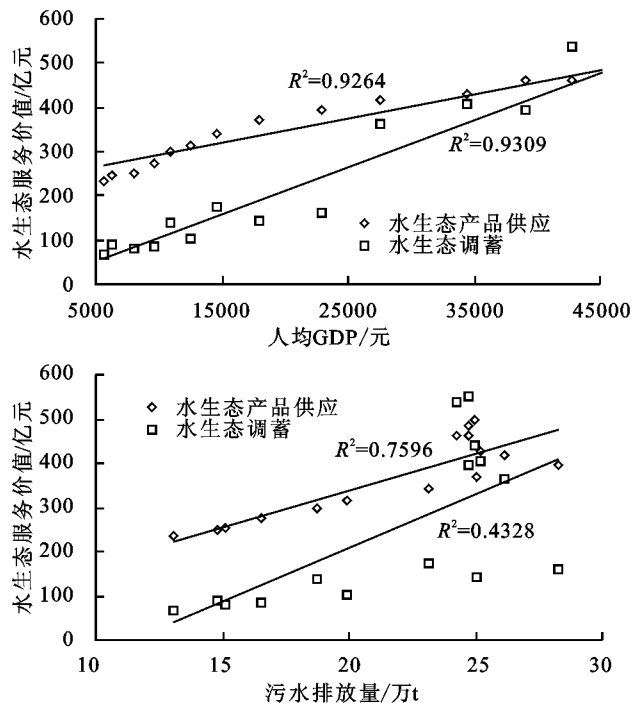
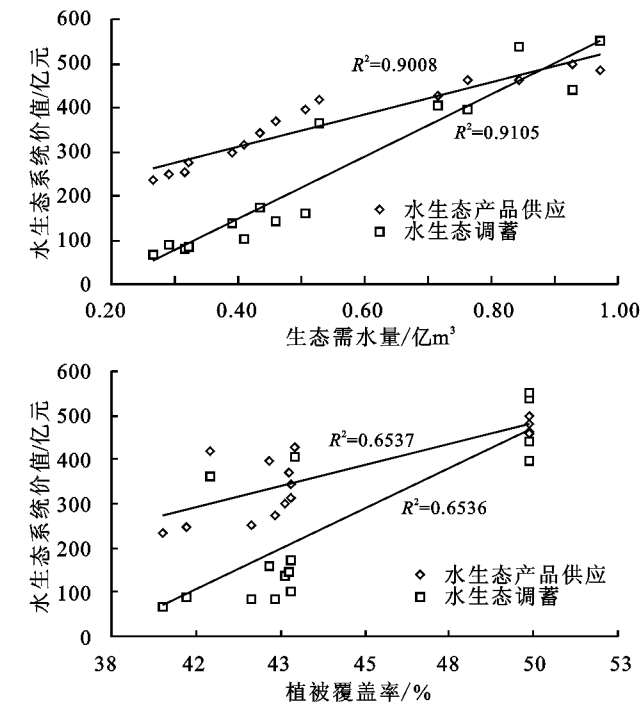


图 3 水生态系统服务价值与经济、环境因子的拟合度

(3) 植被覆盖因子。城镇化景观扩展直接导致建设用地面积对耕地、林地面积的占用,而大面积的退耕还林和撂荒地的出现,却使得植被覆盖率“不降反升”,生态需水量逐年增加(重庆市 15 年间植被覆盖率从 27% 增长至 45%,生态需水量也从 0.32 亿 m^3 提升至 0.97 亿 m^3)。而植被覆盖率的增加又会直接增加生物的栖息空间,区域植被固碳释氧、生物多样性维持能力增加,且生态景观也促进旅游景观资

源的开发和利用。另外,由于重庆市发生干旱的概率较低,故将生态用水量代替实际生态需水量。由生态需水量、植被覆盖率与水生态系统价值的回归系数(图 4)可知,生态需水量与水生态产品供应、水生态调蓄的回归系数 R^2 达 0.9 以上,即生态需水量从 0.26 亿 m^3 上升至 0.96 亿 m^3 时,水生态产品供应、水生态调蓄的价值分别增长了 249.1 亿元、483.01 亿元,但植被覆盖率与各项水生态系统服务价值的相关性较小,回

归系数 R^2 均小于 0.7。表明植被覆盖对水生态系统



服务的影响率较低,关联性不强。

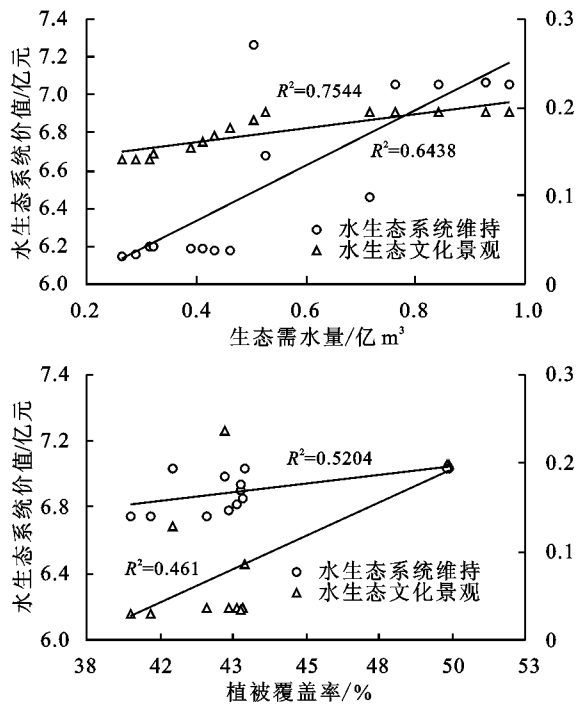


图 4 水生态系统服务价值与植被覆盖因子的拟合度

4 结论与讨论

近 15 年来,重庆市水生态系统服务价值呈波动性增长趋势,其总服务价值由 2001 年的 555.99 亿元提升到 2015 年的 1 340.3 亿元,是 2001 年的 2.41 倍,年均增长率 7.09%。其中,水生态调蓄价值增长率最为明显,价值量同期增长 483.01 亿元,比重增加至 41.06%,成为水生态系统中价值量最大的服务类型;水生态文化景观价值变化幅度最小,且 2/3 年份价值量呈下降趋势,年均增长率仅有 2.36%。整体而言,水生态系统总价值主要由水生态产品供给、水资源蓄积、COD、氨氮降解 3 项服务构成,虽然 3 项价值总量的比重不断下降,但其年均比重依然达到 66.44%。

水生态系统价值量的影响因子相关性与线性回归分析结果可知,常住人口数(X_4)、城市化水平(X_5)、生态需水量(X_6)、污水排放量(X_7)、植被覆盖率(X_9)、人均 GDP(X_{10})为水生态系统各项服务价值的主要影响因子,其回归模型代表城市化水生态系统价值的影响因素与过程。其中,人口因子、经济与环境因子、植被覆盖因子与水生态产品供给、水生态调蓄价值存在显著正相关,其回归模型的系数 R^2 整体水平达 0.71,但与水生态系统维持、水生态文化景观价值呈微弱的正相关,表明水生态系统的社会经济服务逐渐成为主导型服务,其价值比重也不断增加。

本文根据水生态系统价值量计算的常规方法,参考 Costanza、谢高地等国内外学者的价值计算系数,

得到重庆市 15 项水生态系统服务价值的时序变化特征,并基于主要影响因子的线性回归模拟结果,分析出城市化对水生态系统服务价值的占用过程与影响因素,其评价研究能够对当地政府制定水资源的利用、管理措施提供参考依据。然而,对于水生态系统服务的分析仍存在以下几点思考:

(1) 水生态系统价值计算以水生态系统服务的理论价值量还是以社会经济活动的实际价值量为依据,仍然存在一定的争议。如水资源供给量的理论价值为区域水资源总量的价值,其实际价值为人们用水量的市场价值,相比而言,水资源总量价值受气候变化影响明显,而用水量的实际价值则由社会经济发展需水量决定。为揭示城市化过程对水生态系统服务的利用水平及其影响,本文采用市场价值法、替代工程法等方法计算对其服务的实际占用量价值,其价值量变化过程表明城市化的人类活动已成为水生态系统服务价值的主要影响因素。

(2) 水生态系统服务价值计算是为其为社会经济发展提供的资源量为依据,其主要影响因素包括气候变化、城市化和大型工程活动等。本文在影响因素的相关性分析和回归分析的基础上筛选出主要影响因子与影响程度,分析结果与重庆市社会经济状况基本吻合。但影响因子与服务价值的具体影响机制和过程还需要进一步细化研究,从而区分出不同影响因子对不同水生态系统服务种类的影响,为水生态系统服务的有效管控提供更加科学的理论依据。

参考文献:

- [1] Yates D, Purkey D, Sieber J, et al. Weap21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation[J]. *Water International*, 2005, 30(4): 501-512.
- [2] 刘蕾, 夏军, 丰华丽, 等. 水生态系统服务功能变化的驱动因子分析: 以三工河流域为例[J]. *干旱区地理: 汉文版*, 2005, 28(3): 347-351.
- [3] Ehrlich P R, Mooney H A. Extinction, substitution, and ecosystem services[J]. *BioScience*, 1983, 33(4): 248-254.
- [4] 魏强, 佟连军, 杨丽花, 等. 三江平原湿地生态系统生物多样性保护价值[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 935-943.
- [5] 张振明, 刘俊国, 申碧峰, 等. 永定河(北京段)河流生态系统服务价值评估[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1851-1857.
- [6] Elsin Y K, Kramer R A, Jenkins W A. Valuing drinking water provision as an ecosystem service in the Neuse River Basin[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2010, 136(4): 474-482.
- [7] 梁鸿, 潘晓峰, 余欣繁, 等. 深圳市水生态系统服务功能价值评估[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1474-1487.
- [8] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [9] Egan K J, Herriges J A, Kling C L, et al. Valuing water quality as a of water quality measures[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2010, 91(1): 106-123.
- [10] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [11] 张诚, 严登华, 郝彩莲, 等. 水的生态服务功能研究进展及关键支撑技术[J]. *水科学进展*, 2011, 22(1): 126-134.
- [12] Dennedy-Frank P J, Muenich R L, Chaubey I, et al. Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions [J]. *Journal of environmental management*, 2016, 177(7): 331-340.
- [13] Houtven G V, Mansfield C, Phaneuf D J, et al. Combining expert elicitation and stated preference methods to value ecosystem services from improved lake water quality[J]. *Ecological Economics*, 2014, 99(3): 40-52.
- [14] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. *资源科学*, 2008, 30(1): 93-99.
- [15] Terrado M, Acuña V, Ennaanay D, et al. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 37(1): 199-209.
- [16] Ping Z, Liang H, Xin F, et al. Ecosystem service value assessment and contribution factor analysis of land use change in Miyun County, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(6): 7333-7356.
- [17] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响: 以呼和浩特—包头—鄂尔多斯城市群地区为例[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1691-1704.
- [18] Sample J E, Baber I, Badger R. A spatially distributed risk screening tool to assess climate and land use change impacts on water-related ecosystem services [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 83(9): 12-26.
- [19] 裴厦, 谢高地, 鲁春霞, 等. 水利工程梯级开发对河流生态系统服务累积影响浅析: 以猫跳河为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1469-1474.
- [20] 李景保, 代勇, 殷日新, 等. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 809-817.
- [21] Toth F L. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment [M]. Washington DC. Island press, 2003.
- [22] 王浩, 陈敏建, 唐克旺. 水生态环境价值和保护对策 [M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2004.
- [23] 孙凤青, 杨志平, 景娟, 等. 重庆农产品及农资价格周报 2016 年第十二期[J]. *南方农业*, 2016, 10(9): 255-256.
- [24] 殷文伟, 牟敦果. 宁波—舟山港腹地分析及对发展港口经济的意义[J]. *经济地理*, 2011, 31(3): 447-452.
- [25] 吴腾飞, 邓湘雯, 黄文科, 等. 南县森林生态系统服务功能价值评估[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(10): 109-115.
- [26] 周涛, 李天宏. 延河流域土壤侵蚀经济损失评估[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 115-119.
- [27] 闫人华, 高俊峰, 黄琪, 等. 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5197-5206.
- [28] 王晓青, 郭劲松. 三峡蓄水对小江 COD_{Cr}, NH₃-N 及 TP 纳污能力的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(4): 674-678.
- [29] 李焯楠, 卢培利, 宋福忠, 等. 排污权交易定价下的 COD 和氨氮削减成本分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(3): 50-53.
- [30] 何太蓉. 重庆市湿地资源利用中存在的问题及对策[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2002, 19(2): 60-63.
- [31] 韩松, 何太蓉, 班荣舶. 升金湖湿地生态系统服务功能价值分析[J]. *中国水土保持*, 2015, 22(6): 24-27.
- [32] 封瑛. 梁子湖生态系统服务功能价值评估[D]. 武汉: 湖北大学, 2012.
- [33] 姚玲, 廖和平, 邓春燕, 等. 基于土地利用变化的三峡库区生态服务价值损益分析: 以重庆市巫山县为例[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(5): 91-96.
- [34] 任洪昌, 张礼宏, 王纯, 等. 闽江河口湿地与垦殖地的空气负离子含量研究[J]. *湿地科学*, 2014, 12(4): 424-428.