

DOI: 10.5846/stxb201806281432

谢启姣, 刘进华. 1987—2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应. 生态学报, 2020, 40(21): 7840-7850.

Xie Q J, Liu J H. Spatio-temporal dynamics of lake distribution and their impact on ecosystem service values in Wuhan urbanized area during 1987—2016. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7840-7850.

1987—2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应

谢启姣^{1,2,*}, 刘进华^{3,4}

1 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062

2 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062

3 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092

4 浙江理工大学艺术与科技学院, 杭州 310018

摘要:城市湖泊面积萎缩、水体污染及流域生态系统功能退化已成为影响城市生存与发展的重要环境问题,明确城市湖泊时空演变特征及其生态系统服务价值响应能强化人类对城市湖泊的保护认知,对维护湖泊及流域生态系统稳定、确保城市湖泊资源可持续利用有着重要意义。选取武汉市现主城区 1987、1996、2007 和 2016 年遥感影像,提取湖泊及流域水面信息,探讨武汉城市湖泊时空演变特征及其驱动力;并结合不同时期社会经济、自然环境等实际,进行湖泊水域生态功能服务价值定量估算,探讨其对人类活动及湖泊时空演变的响应规律。主要结果如下:(1) 29 年间,武汉主城区湖泊水域面积共缩减 82 km², 减少了 56.9%;越靠近城市建成区,湖泊面积缩减越明显;湖泊面积越小,填占现象越严重;湖泊水系由 1987 年纵横交错的网络格局发展为 2016 年相互分散的独立斑块。(2) 农业生产和城市建设是造成湖泊面积减少的主要原因,相关保护政策及条例的实施是湖泊面积增加的驱动因素,城市不同发展时期主要的驱动因素各异。(3) 1987—2016 年,武汉主城区湖泊水域生态系统服务价值由 20.95 亿元减少到 6.78 亿元,共减少了 67.64%;城市建设与发展需要导致的湖泊水域面积减少和水质恶化是武汉主城区湖泊水域生态功能退化、生态服务价值降低的主要原因。(4) 各生态服务功能的估算价值依次为:调蓄洪水>净化水质>涵养水源>提供生物栖息地>文化娱乐>教育科研>调节气候>固碳>释氧>扬尘削减,其中湖泊及流域所特有的调蓄洪水、净化水质及涵养水源等服务功能生态价值巨大,有着其他生态系统不可替代的优势。

关键词:城市湖泊;时空演变;生态系统服务;定量估算

Spatio-temporal dynamics of lake distribution and their impact on ecosystem service values in Wuhan urbanized area during 1987—2016

XIE Qijiao^{1,2,*}, LIU Jinhua^{3,4}

1 School of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China

2 Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei Province), Wuhan 430062, China

3 College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

4 School of Art and Design, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The area reduction, water pollution and ecosystem function degradation of urban lakes have threatened the city's health and development. Monitoring the spatio-temporal evolution of urban lakes and its impact on the ecosystem service values can help promote the perception of lake protection and provide informative data for using the lake resources in a sustainable way. It is of great significance to maintain the stability and health of urban lake ecosystem. In this study, lake

基金项目:国家自然科学基金项目(41401186);湖北省自然科学基金项目(2019CFB538)

收稿日期:2018-06-28; 修订日期:2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xieqijiao@126.com

distribution information was derived from the Landsat images acquired on September 26, 1987, October 4, 1996, July 31, 2007 and July 23, 2016 in Wuhan urbanized area to investigate the spatio-temporal dynamic of urban lakes and its main driving forces. Based on the varied natural, social and economic conditions in the study area, the ecosystem service values of urban lakes in different studied years were estimated accordingly. The dynamic responses of urban lake ecosystem service values to lake environment variations and human activities were also discussed. The results indicated that: (1) the lake extent in Wuhan urbanized area shrank from 143.9 km² in 1987 to 61.9 km² in 2016, with the decrease of 56.9%. Those lakes with smaller size and shorter distance to the city core were found to be occupied more significantly. Thus, the criss-crossing lake network in 1987 was divided into separate patches in 2016. (2) Human activities such as agricultural production and urban construction were found to be responsible for the majority of the lake area reduction. The implementation of lake protection measures resulted in the lake area increase. While the specific driving factors varied during the studied period. (3) Due to the lake area reduction and water quality deterioration, the lake ecosystem service value reduced from 2.095 billion Yuan in 1987 to 0.678 billion Yuan in 2016, a decrease of 67.64%. (4) The flood storage had the maximum annual value in all ecological functions, followed by waste treatment, water retention, habitats provisioning, entertainment, scientific research, climate regulation, carbon sequestration, oxygen generation, and dust interception. Urban lakes had irreplaceable advantages due to the huge economic values in flood storage, waste treatment and water retention.

Key Words: urban lake; spatio-temporal dynamic; ecosystem service; quantitative evaluation

湖泊及其流域作为陆地水循环中的重要载体,在维持区域水量平衡、调节局部气候、减缓洪涝灾害、提供生物栖息地等方面发挥着举足轻重的作用^[1-2]。人类社会历来依水而居、城市傍水而建,但随着人口的不断集聚和社会经济的迅速发展,围湖造田、填湖建城、工业围湖、开发旅游等人类活动日渐频繁^[3],对湖泊资源及其流域生态系统的利用与干扰日益严重^[4],湖泊萎缩、水体污染和流域生态系统退化已成为影响人类生存与发展的重要环境问题^[5-6]。

对湖泊及流域湿地生态系统服务进行价值评估能直观定量湖泊资源对人类福祉的贡献,强化人类社会对湖泊资源及湿地生态系统的保护认知,是维护湖泊湿地生态系统稳定性、确保湖泊资源可持续利用的前提。近年来,越来越多的学者致力于湖泊湿地的生态价值评估,研究主要集中于洞庭湖^[7]、鄱阳湖^[8]、洪湖^[9]、青海湖^[10]、艾比湖^[11]、千岛湖^[12]、乌梁素海^[13]、青藏高原湖泊^[14]等大型湖泊湿地生态系统,以及安庆沿江湖泊流域^[15]、拉萨河流域湿地^[16]、张掖黑河湿地国家级自然保护区^[17]、吉林西部自然保护区湿地^[18]等流域湿地系统,多采用市场价值法、影子工程法、成本替代法等^[19],通过对人类产生直接影响的供给服务、调节服务和文化服务等生态系统服务价值进行定量估算^[20-21],这些研究通过货币化的评价结果定量分析湖泊及流域湿地的功能构成及生态价值,为湖泊资源的合理利用和科学保护提供了直观依据,为局地湖泊及流域生态系统的可持续发展作出了巨大的贡献。

近年来,由于湖泊生态环境的改变导致资源敏感、生态脆弱^[22-24],其生态服务价值总体呈现下降趋势,人类活动被认为是影响局地湖泊及流域湿地生态系统功能退化的重要原因^[4, 25-27]。探讨人类活动对湖泊及流域的影响及其生态系统服务价值响应对于深入认识城市湖泊的保护价值意义重大,但目前相关研究仍然存在不足^[28],主要表现为:①前人研究大多以干扰相对较少的自然湖泊及流域为对象进行价值评估,而对人类活动干预频繁的城市湖泊及流域研究较少^[22-24, 29],社会经济活动对湖泊时空演变及流域生态系统服务价值的影响有待深入^[4, 6];②由于湖泊及流域湿地生态系统的复杂性,价值估算中多涉及周围森林、草地等其他生态系统的生态产品或服务,导致很多价值交叉重复计算^[20, 30-32],影响到研究结果的科学性;③研究多侧重于单一年份的静态生态服务价值估算^[33-34],而时间序列的动态对比研究较少^[35],生态价值对湖泊时空演变的响应规律研究相对缺乏。

为此,本文选取武汉市 1987、1996、2007、2016 年遥感影像,进行土地利用类型划分,提取现主城区范围内湖泊及流域水面信息,进行湖泊资源与其他土地类型的转移矩阵分析,明确武汉市城市湖泊近 30 年的时空演变方向、幅度及趋势;并结合不同时期社会经济、自然环境等实际,进行城市湖泊及流域水面生态服务价值定量估算,探讨其对城市湖泊时空演变的响应规律,从而更加直观的评估城市湖泊及流域对于武汉城市发展的价值和意义,为城市湖泊资源的合理利用与生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

武汉位于 113°41′—115°05′E, 29°58′—31°22′N 之间,属亚热带季风气候,冬冷夏热,四季分明,雨热同季,年平均气温 15.8—17.5℃,年降水量为 1150—1450 mm,表现出闷热多湿的夏季特征。武汉地处长江中下游平原,江汉平原东部,地势为东高西低、南高北低,境内河道纵横交错,大小湖泊星罗棋布,水域面积占全市面积的近 1/4,素有“百湖之市”的美誉;世界第三大河长江及其最大支流汉江穿城而过,将武汉中心城区一分为三,形成武昌、汉口、汉阳三镇鼎立的格局。

近年来,城市建设和人口集中导致武汉城市湖泊被大量填占、切割及污染^[36],湖泊面积萎缩、格局破碎、连接度降低、水质恶化等^[37-38]严重影响到城市湖泊生态系统服务功能的发挥^[39],对城市湖泊资源的有效保护已迫在眉睫,而城市湖泊时空变化特征及生态服务价值定量是科学保护湖泊资源的前提和依据,本研究选择武汉现主城区(下称主城区)为研究范围,覆盖面积 678 km²,包括三环线以内及局部外延的沌口、庙山和武钢地区。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

研究选择 1987 年 9 月 26 日、1996 年 10 月 4 日、2007 年 7 月 31 日的 Landsat-5 影像和 2016 年 7 月 23 日的 Landsat-8 遥感数据,影像质量完好,覆盖特征稳定,能满足研究要求。依据武汉市 1:100000 数字交通图在软件 Erdas Imagine 9.2 中对遥感影像进行几何校正配准,完成图像裁剪及图像增强等预处理。

主要参考《武汉市统计年鉴》、《武汉市环境状况公报》、《武汉市水务局水资源公报》和相应年份的各类官方统计资料,以及公开发表的武汉市相关研究成果作为统计分析及经济测算的依据。

2.2 湖泊及流域空间信息提取

根据武汉市主城区地表性质及覆盖特征,在软件 Erdas Imagine 中采用监督分类和非监督分类综合方法进行土地利用类型划分,将研究区内地表覆盖分为建设用地、水体、城市绿地和农用地 4 类,四个年份的影像总分类精度均达 85% 以上,满足研究要求。

为保证城市湖泊及流域水域生态系统服务价值估算的独立性和科学性,避免与其他生态系统服务价值的交叉重复,估算时只包括武汉主城区范围湖泊及流域(下简称湖泊)的水面范围;考虑到长江、汉江独特的环境特征及生态效应,在水面空间信息提取时将其剔除。在软件 Fragstas 4.2 中统计相应年份湖泊的面积、数量、密度、形状指数等^[40]表征城市湖泊空间特征的指标。

2.3 湖泊动态变化

2.3.1 动态度

为定量表征城市湖泊在一定时期内的变化速度和幅度,反映城市建设和人类活动对城市湖泊的影响,引入动态度指数^[41]:

$$K = \frac{U_1 - U_0}{U_0} \times \frac{1}{t_1 - t_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, K 值为时间 t_0 到 t_1 时段内城市湖泊的动态度(%), U_0 和 U_1 分别为时间 t_0 和 t_1 对应的湖泊面积。

2.3.2 转移矩阵

为更好的理解城市湖泊空间演变的范围与方向,认识人类活动对城市湖泊的干预与影响,在武汉主城区

土地覆盖类型分类的基础上,构建 1987—1996 年、1996—2007 年和 2007—2016 年 3 个时期城市湖泊水体与建设用地、农用地及城市绿地间的转移矩阵^[4]。

2.4 生态效益及生态价值估算

因本研究重点是定量研究城市湖泊演变直接导致的生态效益及价值变化,故仅估算城市湖泊水域生态效益及生态价值,不考虑水域周边其他湿地生态系统的生态服务价值。由于近年来武汉城市湖泊主要承担生态功能,水产品的生产功能及其价值已不具可比性,因此选择与城市生态系统、人居环境质量等关系密切的生态服务功能进行价值估算(表 1)。

表 1 武汉主城区湖泊主要生态服务价值估算方法

Table 1 Economic valuation approaches for lake ecosystem services in Wuhan urbanized area

生态功能 Ecological Function	生态效益估算内容 Valuated content	生态价值估算方法 Valuation method	估算标准 Ecosystem service value per unit area
涵养水源 Water retention	地表水持有数量及质量	市场价值法	1.2 元/m ³ , 0.071 元/m ³
调蓄洪水 Flood storage	最高水位与常水位蓄水量之差	影子工程法	5.714 元/m ³
调节气候 Climate regulation	水面水汽蒸发量	市场价值法	0.129 元/m ³
固碳 Carbon sequestration	水生植物固碳量	成果参照法,碳税法	990 元/t
释氧 O ₂ Generation	水生植物光合作用释氧量	成果参照法,市场价值法	400 元/t
扬尘削减 Dust Interception	直接吸收截留的大气粉尘量	成果参照法,影子工程法	0.15 元/kg
净化水质 Wastetreatment	自然净化污水量	成果参照法,影子工程法	1.1 元/t
生物栖息地 Habitat provisioning	—	成果参照法,机会成本法	1.3×10 ⁶ 元/km ²
教育科研 Science research	—	成果参照法	2894.5 元/hm ²
文化娱乐 Entertainment	—	成果参照法	3840.2 元/hm ²

(1) 涵养水源 在遥感统计武汉市主城区湖泊水面面积的基础上,依据相关统计年鉴的统计数据,按照水面面积比例赋予权重,得到不同年份城市湖泊常水位状况下的平均水深,可估算出武汉市主城区蓄水总量。根据武汉市城市湖泊水质的变化,1987 年和 1996 年水质较好,85% 以上湖泊水质达 III 类及以上级别,可按生活用水标准 1.2 元/m³ 计价;2007 年以后武汉城市湖泊水质 IV 类及以下级别平均达 80% 以上,按农业或景观用水标准 0.071 元/m³ 计价^[17]。

(2) 调蓄洪水 按照南湖、东湖及沙湖等典型城市湖泊最高水位与常水位对应的平均水深之差作为调蓄洪水水深,并结合遥感估算的湖泊面积估算出总蓄洪量。单位蓄水量库容成本以全国水库建设投资额为标准,取值 5.714 元/m³。

(3) 调节气候 按照武汉市水资源统计资料,1987 年和 1996 年按照武汉东湖年平均蒸发量、2007 和 2016 年按武汉市水面年平均蒸发量为标准取值,结合遥感统计水面面积,估算武汉市城市湖泊水面年水汽蒸发量;参照前人相关研究成果^[17],单位体积水汽调节气候的价值为 0.129 元。

(4) 固碳释氧 生态系统的固碳释氧效益与植被的生物量密切相关,本研究生态价值估算主要以水域范围为主,因此生物量的采集主要来源于水生植物。参考武汉市不同湖泊类型水生植物生物量调查统计结果^[39],结合研究年份的生态环境特征及人类干扰程度,1987 年和 1996 年参照自然湖泊、2007 年参照半自然湖泊、2016 年参照人工湖泊计算平均固碳释氧量,从而估算出水域的固碳释氧总量。固碳价值采用国际通用的瑞典碳税率 150 美元/t,按 2016 年汇率折算为 990 元/t,释氧价值按照工业制氧价格 400 元/t,即可估算出总的固碳释氧价值。

(5) 扬尘削减 城市粉尘削减过程复杂,考虑到估算的可行性,参考前人研究结论^[42],自然环境下湖泊水面年扬尘削减效益为 49.8 t/km²,1987 年和 1996 年研究区人工干扰较小,以自然湖泊粉尘截留效益为标准;由于水面截留吸收粉尘的效益与环境粉尘浓度密切相关,2007 年和 2016 年研究区污染程度相对较高,根据武汉市粉尘空间分布特征^[43],以 2 倍标准即 99.6 t/km² 进行换算,结合水面面积可估算出年扬尘削减的总效

益。粉尘削减价值参照工业粉尘处理成本,标准为 0.15 元/kg。

(6)净化水质 参照相关研究^[17],结合武汉主城区多年污水排放数据,得到人均生活污水量,按照武汉城市污水处理情况,1987 年和 1996 年根据人口数量估算出研究范围相应年份污水排放量,全部按自然净化处理。2007 年和 2016 年按照当年的《武汉市环境状况公报》公布的武汉城区排污总量减去污水处理厂处理的污水量计算。净化水质的生态价值按污水处理厂处理污水的平均成本 1.1 元/t 为标准计算。

(7)提供生物栖息地 城市湖泊能为鸟类和鱼类提供生境栖息地,其单位生态服务功能价值参考中国内地湿地系统生物栖息地价值的平均值^[21],以 130.4 万元/km²的标准计算。

(8)教育科研 湖泊的科研价值在遥感面积统计的基础上,参照全球湿地生态系统平均科研价值和国内湖泊生态服务价值的相关研究成果^[17]取值 2894.5 元/hm²,估算总价值。

(9)文化娱乐 城市湖泊及水域所承载的文化娱乐价值以中国水体生态系统单位面积平均文化娱乐价值 3840.2 元/hm²^[14]为标准,结合对应年份的总面积进行总量估算。

3 结果与分析

3.1 武汉主城区湖泊空间分布特征

图 1 是通过遥感影像解译的 1987、1996、2007、2016 年武汉主城区湖泊水面的空间分布范围,为更好的理解武汉主城区湖泊的空间结构特征,对不同年份的空间格局指标进行了统计(表 2)。结合图 1 和表 2 可知,1987 年和 1996 年呈现出相似的空间结构特征:水体覆盖面积占研究区范围的 1/5 左右,城市湖泊数量多,且分布相对均匀,总体形状复杂,形成较为完整的水体网络体系;到 2007 年和 2016 年,湖泊面积急剧减少,不到

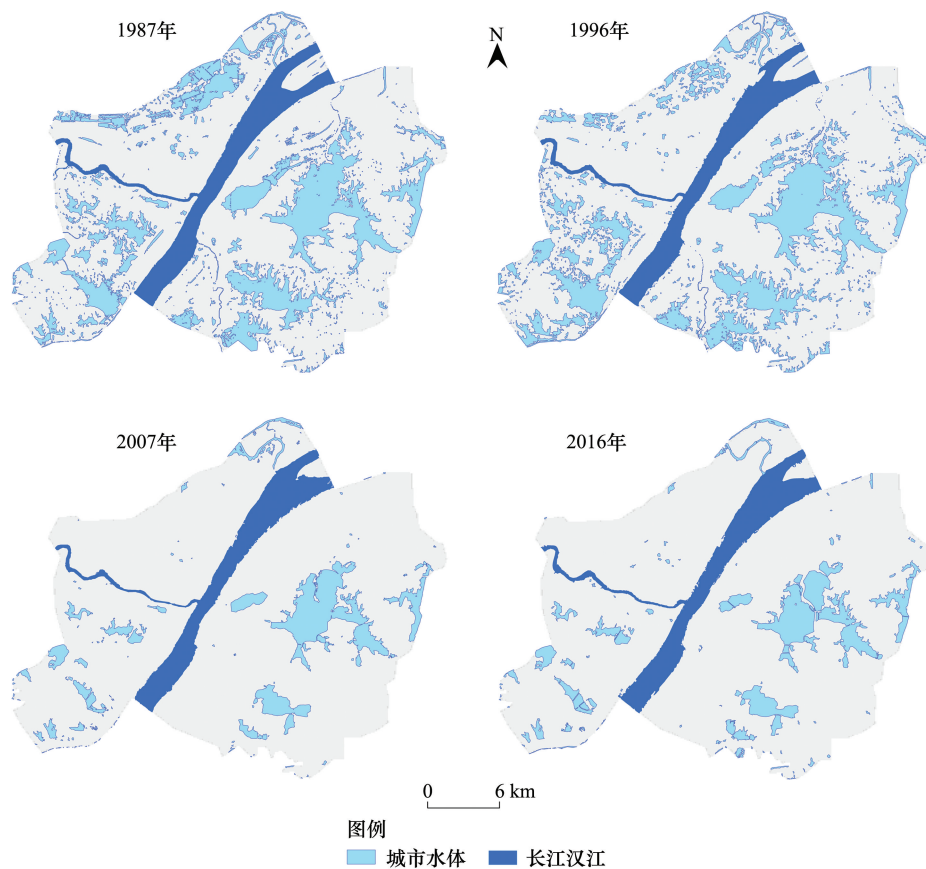


图 1 1987 年,1996 年,2007 年和 2016 年武汉城市湖泊空间分布

Fig.1 Lake distribution maps in 1987, 1996, 2007 and 2016 in Wuhan urbanized area

研究区范围的 1/10,尤其是汉口,城市湖泊基本被填占、所剩无几,武昌的东湖、沙湖、南湖等原有的大型湖泊覆盖范围也严重萎缩,汉阳原有的水系网络已被割裂成独立的斑块。随着武汉社会经济的发展,主城区湖泊的密度由 1987 年的 1.67 个/km²减少到 2016 年的 0.21 个/km²,但平均面积由 1987 年的 12.72 hm²增加到 2016 年的 42.69 hm²,29 年间,保留下来的城市湖泊多为原来面积较大的湖泊,但其面积也缩减明显,面积过小的湖泊基本都被填占,大多数已从武汉主城区消失。结合图 1 的空间分布特征看,武汉市主城区湖泊填占有着近地域性特点,越靠近建成区的湖泊由于经济发展需要被填占越严重,离市中心较远的湖泊填占现象相对较轻。

表 2 武汉主城区湖泊空间结构特征

Table 2 Lake spatial structures in Wuhan urbanized area

年份 Year	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	数量 Number	密度 Density	平均面积 Average area/hm ²	形状指数 Shape index
1987	143.9	21.22	1131	1.67	12.72	32.25
1996	142.9	21.08	976	1.44	14.64	31.25
2007	57.9	8.54	204	0.30	28.38	14.34
2016	61.9	9.13	145	0.21	42.69	15.15

3.2 1987—2016 年武汉主城区湖泊时空演变

表 3 统计了研究期间武汉主城区湖泊的变化情况,1987 年到 2016 年间,武汉主城区的湖泊面积共缩减 82 km²,减少了 56.9%,湖泊水面一半以上都被侵占;以平均每年 2.8 km²的速度消失,而汉口最大的城中湖——塔子湖面积为 0.3 km²,相当于 29 年间平均每年有大约 9 个塔子湖从武汉主城区消失。具体从 1987—1996 年、1996—2007 年及 2007—2016 年 3 个时期看,1987—1996 年 9 年期间,主城区湖泊总面积基本保持不变,年均动态度仅为 -0.08%。变化幅度最大的是 1996—2007 年期间,湖泊总面积减少了 59.5%,共计 85 km²,11 年间相当于 2.5 个东湖水面悄然“蒸发”;平均每年减少 7.7 km²,年动态度达到 5.4%,湖泊生态系统受到严重干扰。2007—2016 年间,湖泊面积首次出现增长,以平均每年 0.4 km²的增幅,9 年间湖泊面积增加 4 km²,增加了 6.9%。

表 3 1987—2016 年武汉主城区湖泊动态特征

Table 3 Changing rate of lake area during 1987—2016 in Wuhan urbanized area

时期 Period	1987—1996	1996—2007	2007—2016	1987—2016
面积变化 Area change/hm ²	-1	-85	4	-82
年均变化量 Area change per year/hm ²	-0.1	-7.7	0.4	2.8
变化率 Rate of change/%	-0.7	-59.5	6.9	-56.9
动态度 Dynamic Degree/%	-0.08	-5.4	0.8	-2

为更好地理解研究期内武汉主城区湖泊的演变方向、幅度及趋势,运用转移矩阵对 1987—1996 年、1996—2007 年和 2007—2016 年的湖泊变化进行动态分析,图 2 为相应时期湖泊水体与建设用地、农用地和城市绿地间的转移空间分布,结合相应时期的社会经济等数据探讨不同时期湖泊演变的主要驱动力。

(1)1987—1996 年:武汉主城区湖泊水域的变化率为 -0.7%,湖泊面积保持平稳,主要是与农用地之间的转化。具体来看(图 2),水体共转出 32 km²,其中有 17 km²转变为农用地(占 53.1%),14 km²转变为建设用地(占 43.8%);共转进 31 km²,其中 90.3%为农用地转变而来。虽然湖泊总面积并没有明显减少,但是仍然有近一半的湖泊被建设用地所侵占,而总量的平稳主要是以占用农用地为代价。总体来看,这一时期主城区湖泊的变化主要是湖泊水面和农用地之间的相互转换,填湖种地和围田养鱼等农业生产活动为其主要空间驱动力。

(2)1996—2007 年:武汉主城区湖泊面积锐减 85 km²,城市水体的变化率为 -59.5%,城市水体共转出

89 km², 其中 53.9% (48 km²) 转向城市建设用, 38.2% (34 km²) 转向农用地。一方面, 由于这一时期转出农用地的 91.09% 城市建设用地开发占用, 因而部分水体被围占为农用地, 导致湖泊面积缩小。另一方面, 城市化导致城市人口迅速增加、城市空间需求加大, 一些湖泊及水体经政府审批被城市道路、市政设施等“征用”; 更多的是由于房地产的迅速崛起, 商业利益驱动导致开发商开始“填湖造城”, 从而导致原来的湖泊和城市水体被填埋。图 2 中可明显看出, 黄塘湖、沙湖、东湖、南湖等大型城市湖泊有明显的缩减趋势, 且基本被房地产开发利用; 而转入的 4 km² 面积则主要来自于天新洲洲头的部分农用地。总体看, 这一时期湖泊水面变化受到农业发展和城市建设的共同作用。

(3) 2007—2016 年: 武汉主城区湖泊面积增加了 4 km², 主要是与建设用地的相互转换, 其中转出 6 km², 全部转为建设用地, 结合图 2 中可知, 转出的水面大部分是由于城市公共绿地和公共设施建设需要; 另有 10 km² 转入, 其中建设用地转进的共有 7 km², 占有所有转入面积的 70%, 其他为农用地 (20%) 和城市绿地 (10%) 共同转入。湖泊面积的增加与 2002 年后武汉市实施的一系列城市湖泊保护条例和措施密切相关, 由于社会各界开始意识到城市湖泊保护的生态意义, 政府开始遏制湖泊填占, 实施湖泊保护。总体来看, 政府的保护政策、条例法规是城市湖泊面积变化的主要驱动因素。

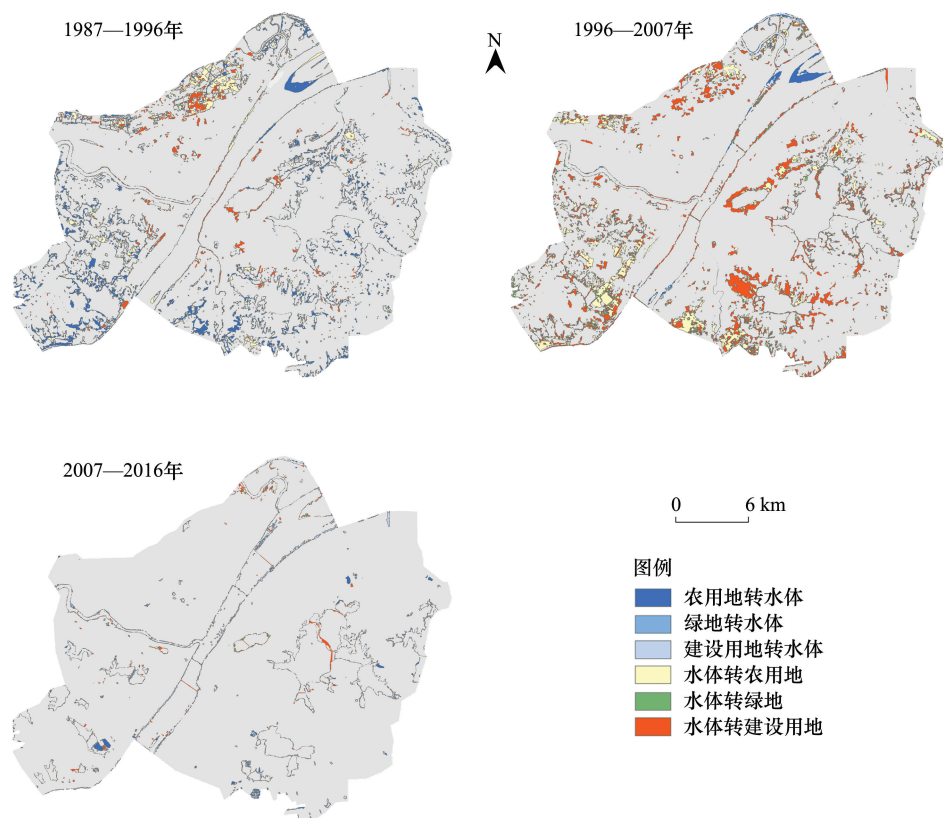


图 2 1987—1996 年, 1996—2007 年和 2007—2016 年武汉主城区湖泊转移空间分布

Fig. 2 Distribution of lake area transfer during 1987—1996, 1996—2007 and 2007—2016 in Wuhan urbanized area

3.3 1987—2016 年武汉城市湖泊生态效益及生态服务价值响应

在遥感提取武汉市主城区不同年份湖泊水域面积的基础上, 结合不同时期湖泊开发利用模式及生态环境特征, 参考相关研究成果, 对武汉主城区相关研究年份的湖泊及流域水面生态效益和生态价值进行了估算 (表 4)。1987 年和 1996 年由于主城区湖泊面积差别较小且生态环境特征类似, 总的生态价值比较接近, 约为 21 亿元; 9 年间生态服务总价值增加 0.17 亿元, 增加了 0.81%, 主要是由于城区人口增加导致湖泊净水价值的提高。从 1996 年到 2007 年 11 年间, 湖泊面积减少了 59.5% (表 3), 主城区湖泊生态服务价值随之减少

14.16 亿元,减少了 67.06%,以平均每年 6.1% 的速度减少,每年损失生态服务价值约 1.29 亿元。2016 年主城区湖泊面积比 2007 年增加了 6.9%(表 3),但其生态服务价值总量却减少了 2.44%,从表 4 中可知,其他各生态服务功能价值均不变或不同程度增加,只有净化水质的生态价值减少且比重较大,导致年度总价值的减少。总体来看,1987—2016 年武汉主城区湖泊生态服务价值减少 14.17 亿元,共减少了 67.64%,总体呈现递减的趋势。一方面由于城市化导致研究区湖泊水面被大量侵占,29 年间减少了 82 km²,使得与面积相关的生态服务价值如调节气候和调蓄洪水的总价值减少幅度过大;另一方面则是由于城市污染排放量增大使湖泊水质恶化,从而导致湖泊水源质量降低、净化水质的功能退化,相应的服务功能价值量明显减少。

表 4 武汉主城区湖泊生态效益及生态价值

Table 4 Benefits and values of lake ecosystem services in Wuhan urbanized area

生态功能 Ecological Function	1987 年			1996 年		
	生态效益 Benefit	生态价值 Value/元	占比 Proportion/%	生态效益 Benefit	生态价值 Value/元	占比 Proportion/%
涵养水源 Water retention	4.7×10 ⁸ m ³	5.64×10 ⁸	26.92	4.67×10 ⁸ m ³	5.60×10 ⁸	26.52
调蓄洪水 Flood storage	1.58×10 ⁸ m ³	9.04×10 ⁸	43.15	1.57×10 ⁸ m ³	8.98×10 ⁸	42.52
调节气候 Climate regulation	1.65×10 ⁸ m ³	21.31×10 ⁶	1.02	1.64×10 ⁸ m ³	21.16×10 ⁶	1.0
固碳 Carbon sequestration	3.69×10 ⁴ t	36.50×10 ⁶	1.74	3.66×10 ⁴ t	36.24×10 ⁶	1.72
释氧 O ₂ Generation	2.71×10 ⁴ t	10.86×10 ⁶	0.52	2.70×10 ⁴ t	10.78×10 ⁶	0.51
扬尘削减 Dust Interception	7.17×10 ³ t	1.07×10 ⁶	0.05	7.12×10 ³ t	1.07×10 ⁶	0.05
净化水质 Waste treatment	2.49×10 ⁸ t	2.74×10 ⁸	13.08	2.76×10 ⁸ t	3.03×10 ⁸	14.35
生物栖息地 Habitat provisioning	-	1.87×10 ⁸	8.93	-	1.86×10 ⁸	8.76
教育科研 Science research	-	0.42×10 ⁸	2.0	-	0.41×10 ⁸	1.94
文化娱乐 Entertainment	-	0.55×10 ⁸	2.63	-	0.55×10 ⁸	2.60
总计 Total	-	20.95×10 ⁸	100	-	21.12×10 ⁸	100

生态功能 Ecological Function	2007 年			2016 年		
	生态效益 Benefit	生态价值 Value/元	占比 Proportion/%	生态效益 Benefit	生态价值 Value/元	占比 Proportion/%
涵养水源 Water retention	1.60×10 ⁸ m ³	0.11×10 ⁸	1.58	1.59×10 ⁸ m ³	0.11×10 ⁸	1.62
调蓄洪水 Flood storage	0.64×10 ⁸ m ³	3.64×10 ⁸	52.30	0.68×10 ⁸ m ³	3.89×10 ⁸	57.37
调节气候 Climate regulation	0.54×10 ⁸ m ³	6.92×10 ⁶	0.99	0.57×10 ⁸ m ³	7.40×10 ⁶	1.09
固碳 Carbon sequestration	724.33 t	0.72×10 ⁶	0.10	1389.70 t	1.38×10 ⁶	0.20
释氧 O ₂ Generation	533.30 t	0.21×10 ⁶	0.03	1021.97 t	0.41×10 ⁶	0.06
扬尘削减 Dust Interception	5.77×10 ³ t	0.87×10 ⁶	0.12	6.17×10 ³ t	0.93×10 ⁶	0.14
净化水质 Waste treatment	1.80×10 ⁸ t	1.98×10 ⁸	28.45	1.33×10 ⁸ t	1.46×10 ⁸	21.53
生物栖息地 Habitat provisioning	-	0.75×10 ⁸	10.78	-	0.80×10 ⁸	11.80
教育科研 Science research	-	0.17×10 ⁸	2.44	-	0.18×10 ⁸	2.65
文化娱乐 Entertainment	-	0.22×10 ⁸	3.16	-	0.24×10 ⁸	3.54
总计 Total	-	6.96×10 ⁸	100	-	6.78×10 ⁸	100

从各生态服务功能的价值构成来看,综合四年的估算结果,调蓄洪水的生态服务价值最大,占总价值的 48.84%,其次为净化水质(19.35%)、涵养水源(14.16%)、提供生物栖息地(10.07%)、文化娱乐(2.98%)、教育科研(2.26%)、调节气候(1.03%)、固碳(0.94%)、释氧(0.28%)和扬尘削减(0.09%)生态服务价值。但不同年份各生态服务价值构成却不完全一致,1987 年和 1996 年构成比例一致,生态服务价值最高的前 3 为分别为调蓄洪水(42.83%)、涵养水源(26.72%)和净化水质(13.71%),共占总服务价值的 83.26%;2007 年和 2016 年构成比例一致,前 3 位依次为调蓄洪水(54.84%)、净化水质(24.99%)和提供生物栖息地(11.29%),占总价值的 91.12%。尽管在主城区湖泊及流域的所有生态服务功能价值中,固碳释氧、调节气候及扬尘削减的价值比例较低,但对于武汉城市发展而言,其生态服务功能同样具有重要意义。以服务价值比重较小的扬

尘削减为例,相对所有生态服务功能价值总和,其占比仅为 0.05%—0.14%,平均不足总量的 0.1%;但根据武汉市环境质量状况公报结果,2016 年武汉主城区降尘平均值为每月 8.48 t/km²,年总降尘量为 68993.3 t,研究估算当年湖泊扬尘削减量为 6165.2 t,占全年总降尘量的 8.94%,其生态效益不可忽视。

4 讨论

4.1 生态系统服务单位价值对比

湖泊或湿地生态系统的生态服务价值与其面积、生态环境及所选择的生态服务功能指标息息相关,选取城市湖泊水域生态系统主要的生态功能,分别与中国内陆湿地生态系统 71 个湿地案例^[21]以及湖泊型湿地生态系统^[7,9,11-12]相关生态功能单位服务价值进行对比(表 5)。从表中可知,本研究城市湖泊水域固碳和释氧的单位生态服务价值远比湖泊型湿地和内陆湿地生态系统对应的平均值小,因固碳释氧和调节气候的服务价值与植物的生物量直接相关^[17,39],而武汉主城区湖泊水域只计算水生植物的生物量,不包括湖泊消落带或滨水植物的生态价值。武汉主城区湖泊水域涵养水源、调蓄洪水和净化水质的单位服务价值均远低于内陆湿地生态系统的平均值,但调蓄洪水和净化水质的单位生态价值明显高于湖泊型湿地生态系统的平均值。这是因为内陆湿地的研究案例对生态服务价值的估算针对整个湿地系统,估算结果会与滨水草地、森林等其他生态系统的服务价值交叉或重复,导致结果偏高^[21];而对照的湖泊型湿地大多以自然或人为干扰较小的大型湖泊为主,相对于城市湖泊而言,调蓄洪水和净化水质的生态需求较小^[7,11]。前人不同案例地湿地生态系统的生态功能单位服务价值差别较大,不同研究对于湿地生态系统的内涵认定和范围界定标准不同^[21,23,32],且受到其他如区域特征、社会经济背景、计算方法等因素的影响^[7-18],影响了研究结果的可比性。

表 5 主要生态功能单位价值量统计/($\times 10^4$ 元/km²)

Table 5 Economic values per km² of the main ecosystem services for lake and wetland

生态功能 Ecological function	涵养水源 Water retention	调蓄洪水 Flood storage	固碳 CO ₂ sequestration	释氧 O ₂ Generation	净化水质 Waste treatment
本研究平均值 Averaged value from this study	205.5	628.3	13.55	4.0	245.1
内陆湿地平均值 ^[20] (变化范围) Average value from inland wetlands (variation)	893.3 (89.2—1461.3)	927.7 (100.3—1710.8)	180.2 (35.1—402.0)	178.0 (30.7—406.7)	578.9 (121.5—1218.1)
湖泊型湿地平均值(变化范围) Average value from natural lakes (variation)	161.3 (33.5—400.2)	282.5 (84.3—653.4)	63.3 (2.6—142.7)	31.0 (2.9—79.1)	18.7 (6.9—37.5)

4.2 生态服务功能价值构成对比

武汉主城区湖泊水域与多数湿地生态系统一样,生态服务功能价值构成中,调蓄洪水的生态价值比重最大,占到总价值量的 48.84%,而湿地生态系统^[17,20,29]对应比重平均为 33.02%—56%,结果基本一致;武汉主城区湖泊净化水质、涵养水源的生态价值比重仅次于调蓄水量的功能,分别为 19.35%和 14.16%,前人研究中湿地生态系统对应值变化幅度大,但在总价值量中同样占有较大的比重^[17,21,32]。这说明无论是湖泊水面还是湿地生态系统,尽管由于地域、时空、生态系统构成、生态功能指标体系等的差异性,各生态功能的服务价值比值有所区别,但是调蓄洪水、净化水质、涵养水源等水体所特有的生态功能服务价值,均占有较重的分量,具有森林、草地等其他自然生态系统所不具备的生态优势,有着不可替代的作用;尤其在硬质地表覆盖比例高、地表径流大的城市地区,湖泊和湿地生态系统由于其特殊的地形条件,在抵御洪涝灾害、调蓄水量方面有着极其重要的地位,是城市人居环境健康、维护城市生态系统稳定的保障。而本研究中生态价值比例较低的调节气候(1.03%)、固碳释氧(1.22%)功能,在湿地生态系统中均有较高的占比^[15,17-18,21],分别为 10%—20.86%和 7.75%—20.46%,主要原因在于湿地生态系统中沼泽、滩涂、滨水等植物的生物量较高,导致城市湖泊水域与湿地生态系统相关价值比重差别较大。

4.3 研究不足及展望

本文利用遥感技术动态分析 1987—2016 年武汉市主城区湖泊水域的时空演变特征及其驱动因素,定量探讨湖泊水域生态系统服务价值对人类活动及湖泊时空演变的响应规律,能直观揭示湖泊水域在维持城市生态系统安全中的重要作用,明确人类活动对城市湖泊时空演变及生态服务功能价值的影响,但仍存在一定的误差和不确定性:研究中考虑到湖泊生态系统服务价值会受到气候、水质、干扰程度等因素的影响,在进行生态价值估算时 1987、1996、2007、2016 年相关指标按照相应时期的实际情况取值,保证了一定的科学性,但由于不同时期城市湖泊资源所处的生态、社会经济环境复杂多变,核算时需要考虑更多的影响因素,才能保证估算结果的精确。同时,在估算湖泊水域提供生物栖息地、教育科研、文化娱乐等生态功能服务价值时,由于其服务方式难以直接定量,考虑到研究结果的可比性,直接采用国内相关研究结果的平均值,这在一定程度上会影响生态价值的估算结果。另外,城市湖泊由于人类干扰较大,生态系统服务价值不仅受到所处环境、生态系统等自然因素的影响,更受不同经济发展时期湖泊资源利用方式、管理水平、价值偏好等人文因素的影响,相关的定量研究将是未来研究的重点。

5 结论

基于遥感影像及 GIS 技术,对 1987—2016 年武汉市主城区湖泊水域的时空变化进行监测,在此基础上定量估算城市湖泊及流域水面的生态系统服务价值及变化,探讨人类干扰较为频繁的城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应,有助于直观理解城市湖泊保护对城市生态系统的意义。主要的研究结论如下:

(1)武汉市主城区湖泊及流域占研究区总面积的比例从 1987 年的 21.22% 降到 2016 年的 9.13%, 29 年间共缩减 82 km², 减少了 56.9%; 湖泊及流域水系由原来纵横交错的网络格局被割裂成相互分散的独立斑块; 且越靠近城市建成区, 湖泊面积缩减越明显, 湖泊面积越小, 填占现象越严重。

(2)人类的社会经济活动是武汉主城区湖泊动态变化的主要驱动力: ① 1987—1996 年: 湖泊及流域变化率为 -0.7%, 主要是与农用地之间的转换, 填湖种地和围田养鱼等农业活动是湖泊面积变化的主要原因; ② 1996—2007 年: 湖泊及流域总体变化率为 -59.5%, 主要是与农用地和建设用地的转换, 围湖造田等农业生产和房地产开发等城市建设共同导致湖泊面积的急剧减少; ③ 2007—2016 年: 湖泊及流域变化率为 6.9%, 主要是与建设用地的相互转换, 湖泊保护政策及条例法规的实施是主城区湖泊面积增加的主要原因。

(3)城市湖泊及流域面积减少导致调节气候和调蓄洪水的生态服务价值大量减少, 城市生活污染和工业污染等排放量增加引起的水质恶化使城市湖泊涵养水源和净化水质的生态功能退化, 降低了其总体生态效益及生态系统服务价值。1987—2016 年, 武汉主城区湖泊及流域生态服务价值由 20.95 亿元减少到 6.78 亿元, 29 年间共减少 14.17 亿元, 减少了 67.64%; 其中 1996—2007 年间减少速度最快, 平均每年减少 6.1%、损失生态服务价值 1.29 亿元。

(4)从各生态服务功能的价值构成来看, 城市湖泊各生态服务功能的比重依次为: 调蓄洪水 > 净化水质 > 涵养水源 > 提供生物栖息地 > 文化娱乐 > 教育科研 > 调节气候 > 固碳 > 释氧 > 扬尘削减。虽然城市湖泊及流域主要生态功能的单位服务价值远比湿地生态系统的平均值低, 但其特有的调蓄洪水、涵养水源、净化水质、提供生物栖息地等服务功能生态价值巨大, 有着其他生态系统不可替代的优势; 大气调节等生态服务功能虽然价值量较小, 但对提高城市人居环境质量而言, 其生态效益亦不可忽视。

参考文献 (References):

- [1] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis. Washington DC: World Resources Institute, 2005.
- [3] 刘园园, 陈光杰, 施海彬, 陈小林, 卢慧斌, 段立曾, 张虎才, 张文翔. 星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程. 生态学报, 2016, 36(10): 3063-3073.

- [4] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [5] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003-2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. 地理学报, 2011, 66(9): 1219-1229.
- [6] 王志强, 崔爱花, 缪建群, 王海, 黄国勤. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6253-6264.
- [7] 庄大昌. 洞庭湖湿地生态系统服务功能价值评估. 经济地理, 2004, 24(3): 391-394, 432-432.
- [8] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究. 生态学报, 2004, 24(7): 1480-1485.
- [9] 莫明浩, 任宪友, 王学雷, 肖锐. 洪湖湿地生态系统服务功能价值及经济损失评估. 武汉大学学报: 理学版, 2008, 54(6): 725-731.
- [10] 姜翠红, 李广泳, 程滔, 陈占涛, 张浩然. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因子研究. 资源科学, 2016, 38(8): 1572-1584.
- [11] 谢正宇, 李文华, 谢正君, 李新琪. 艾比湖湿地自然保护区生态系统服务功能价值评估. 干旱区地理, 2011, 34(3): 532-540.
- [12] 相晨, 严力蛟, 韩轶才, 吴志旭, 杨文杰. 千岛湖生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3875-3884.
- [13] 段晓男, 王效科, 欧阳志云. 乌梁素海湿地生态系统服务功能及价值评估. 资源科学, 2005, 27(2): 110-115.
- [14] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [15] 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.
- [16] 王春连, 张德铨, 王兆锋, 摆万奇. 拉萨河流域湿地生态系统服务功能价值变化. 资源科学, 2010, 32(10): 2038-2044.
- [17] 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.
- [18] 臧正, 郑德凤, 孙才志, 张雨. 吉林西部自然保护区湿地生态效益及生态恢复评价. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1447-1454.
- [19] 张萍, 马涛. 湿地生态系统服务价值评估的国内研究评述. 湿地科学, 2011, 9(2): 203-208.
- [20] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 苗鸿. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [21] 张翼然, 周德民, 刘苗. 中国内陆湿地生态系统服务价值评估——以 71 个湿地案例点为数据源. 生态学报, 2015, 35(13): 4279-4286.
- [22] 尹占娥, 田娜, 殷杰, 迟潇潇. 基于遥感的上海市湿地资源与生态服务价值研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(6): 925-930.
- [23] 张慧, 李智, 刘光, 祝炜平. 中国城市湿地研究进展. 湿地科学, 2016, 14(1): 103-107.
- [24] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 唐建军. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [25] 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. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [26] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展. 地理研究, 2001, 20(1): 120-128.
- [27] 朱军, 李益敏, 余艳红. 基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究——以星云湖流域为例. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1237-1250.
- [28] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [29] 马东春, 董正举, Wong C, 黄金, 欧阳志云. 基于永定河生态修复工程的河流生态服务价值增量评估. 生态经济, 2017, 33(11): 153-157.
- [30] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: a meta-analysis. Ecological Economics, 2001, 37(2): 257-270.
- [31] Wallace K J. Classification of ecosystem services; problems and solutions. Biological Conservation, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [32] 尹小娟, 宋晓谕, 蔡国英. 湿地生态系统服务估值研究进展. 冰川冻土, 2014, 36(3): 759-766.
- [33] 傅娇艳, 丁振华. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(3): 681-686.
- [34] 刘永, 郭怀成, 范英英, 王丽娟. 湖泊生态系统动力学模型研究进展. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1169-1175.
- [35] 陈希, 王克林, 祁向坤, 李洪斌. 湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应. 经济地理, 2016, 36(5): 175-181.
- [36] 淡永利, 王宏志, 张欢, 张晓峰, 纵兆伟. 2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化. 生态学报, 2014, 34(5): 1311-1317.
- [37] 陈海珍, 石铁柱, 邹国锋. 武汉市湖泊景观动态遥感分析(1973—2013 年). 湖泊科学, 2015, 27(4): 745-754.
- [38] 张梦珂, 刘艳芳, 安子豪, 危小建, 陈奕云. 武汉城市化进程对湖泊景观格局的空间非平稳性影响分析. 地理信息世界, 2016, 23(3): 53-59.
- [39] 王凤珍. 城市湖泊湿地生态服务功能价值评估——以武汉市城市湖泊为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [40] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2011: 86-92.
- [41] 罗维, 易海杰, 李红举, 贾文涛, 冯兆忠. 洋河流域土地利用时空变异及其对生态服务功能价值的影响. 生态学报, 2017, 37(16): 5342-5351.
- [42] 徐海, 刘晓燕, 安芷生, 侯昭华, 董吉宝, 刘斌. 青海湖现代沉积速率空间分布及沉积通量初步研究. 科学通报, 2010, 55(4/5): 384-390.
- [43] 周珂, 郭姝荃, 周新萌, 范颖, 郑燕萍. 武汉市降尘污染特征及影响因素. 中国环境监测, 2016, 32(1): 58-63.