

DOI: 10.5846/stxb201401030016

闫人华, 高俊峰, 黄琪, 赵家虎, 董川永, 陈肖飞, 张志明, 黄佳聪. 太湖流域圩区水生生态系统服务功能价值. 生态学报, 2015, 35(15): 5197-5206.

Yan R H, Gao J F, Huang Q, Zhao J H, Dong C Y, Chen X F, Zhang Z M, Huang J C. The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5197-5206.

太湖流域圩区水生生态系统服务功能价值

闫人华^{1,2}, 高俊峰^{1,*}, 黄琪^{1,2}, 赵家虎^{1,2}, 董川永^{1,2}, 陈肖飞^{1,2}, 张志明¹, 黄佳聪¹

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:以遥感图像、气象水文资料和实地水生态状况调查数据为基础, 利用构建的评价指标体系对太湖流域圩区的水生生态系统服务功能进行了评价, 并分析其空间差异性。结果表明: 太湖流域的圩区水生生态系统服务功能价值为 325.93×10^8 元, 以对生态系统的调节、维持功能等间接使用价值为主, 是直接使用价值的 6.18 倍。主要受水域分布面积大小的影响, 圩区水生生态系统服务功能价值总量呈现出杭嘉湖区 > 阳澄淀泖区 > 湖西区 > 浙西区 > 武澄锡虞区 > 浦西区 > 太湖区 > 浦东区的特点。太湖流域单位面积圩区水生生态系统服务功能的平均价值为 $22.73 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 整体表现为南高北低, 西高东低的空间分布格局。

关键词: 圩区; 水生生态系统; 服务功能; 评价; 太湖流域

The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin

YAN Renhua^{1,2}, GAO Junfeng^{1,*}, HUANG Qi^{1,2}, ZHAO Jiahu^{1,2}, DONG Chuanyong^{1,2}, CHEN Xiaofei^{1,2}, ZHANG Zhiming¹, HUANG Jiacong¹

1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Today, the polder area, which is an important geographic unit in economically developed Taihu basin, comprise $10,630.91 \text{ km}^2$, accounting for 28.81% of the total basin area. A polder is an artificially created ecosystem in a low-lying zone of land adjoining a lake, river or other water body and enclosed by dikes. It can effectively prevent flooding and alleviate drought by controlling the influx of water with manually operated devices, thus ensuring the orderly development of industry and agriculture. Polder waters including river and pond are the lifeline of the polder ecosystem and maintain its overall stability, which directly affects other ecosystem functions. Therefore, quantitative estimation of polder aquatic ecosystem services is beneficial to deepening the understanding of its status in the basin ecosystem. This study has important theoretical and administrative significance for the optimal regulation of the ecosystem structure and reasonable allocation of water resources in the Taihu basin. The polder aquatic ecosystem services and their spatial variability in the Taihu basin were analyzed using the established evaluation index system based on the remote sensing image, meteorological, hydrological, and fieldwork data. The results showed that the polder aquatic ecosystem supplied $8.61 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ of water, provided $58.74 \times 10^4 \text{ t/a}$ of aquatic products, $7.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ of regulated water and $27.12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ of stored water, reduced $3.62 \times 10^4 \text{ t/a}$ of nitrogen and $1.10 \times 10^4 \text{ t/a}$ of phosphorous, controlled $4.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ of flooding water, assimilated $129.08 \times 10^4 \text{ t/a}$ of carbon and produced $153.60 \times 10^4 \text{ t/a}$ of oxygen, maintained biodiversity at 1.34 in terms of *Shannon's diversity index*, and lowered summer temperature for 2.27°C . The total value of polder ecosystem services in

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501-001-03, 2012ZX07506-001); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目 (NIGLAS2012135005)

收稿日期: 2014-01-03; **修订日期:** 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

Taihu basin was estimated at 325.93×10^8 yuan/a. About 13.93% of the estimated value came from the provisioning services including fresh water and aquatic products. About 83.92% was contributed by regulation services including water regulation, water storage, water purification, flooding control, temperature regulation, carbon fixation, and oxygen production. Cultural services accounted for 1.41% and supporting services including biodiversity maintenance made up 0.74%. Thus, the regulating function predominated in the total value. The values of various services are in the ordered of: water storage > water regulation > aquatic products > flood control > carbon fixation > oxygen production > scientific research and culture > water supply > biodiversity maintenance > nitrogen reduction > phosphorus reduction > temperature regulation. The value of the polder aquatic ecosystem services was dominated by the indirect value, which was 6.18-fold larger than the direct value. Because of the different water surface area, the value of the total services of each subregion was as follows: Hangjiahu > Yangchengdianmao > Huxi > Zhexi > Wuchengxiyu > Puxi > Taihu > Pudong. The average value of aquatic ecosystem services per unit area of the polder in the Taihu basin was $22.73 \text{ yuan m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Water supply, aquatic products, water regulation, water storage, nitrogen and phosphorus reduction, flood control, temperature regulation, carbon fixation, oxygen production, research culture, and biodiversity maintenance were worth 0.30, 2.87, 3.43, 12.96, 0.04, 0.02, 1.26, 0.02, 0.92, 0.43, 0.32, and 0.17 $\text{yuan m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. The aquatic ecosystem service benefits per unit area of the Taihu basin were higher in the west and the south than in the east and the north. This paper provides scientific guidance for proper management of aquatic ecosystems and ecological restoration, which employ differentiated measures to address main environmental problems of each subregion.

Key Words: polder; aquatic ecosystem; services; assessment; Taihu basin

水作为一种珍贵的生态自然资源,是支撑整个地球生命系统的基础。水生态系统与生态过程中所形成的及所维持的人类生存与发展的产品供给、调节服务、支持服务和文化服务等方面的环境条件与效用称为水生态服务功能。运用经济价值指标量化水生态系统的服务价值是人类对水生态系统的认识成果作用于经济决策过程的纽带,为水资源的合理分配,实现水资源利用的生态、经济和社会效益的最优化提供理论支持^[1]。20 世纪 70 年代美国学者 Larson 提出了湿地功能评价体系^[2],此后许多学者开始对不同区域的水生态系统服务功能展开了评价与分析^[3-5],极大地推动了该领域的研究进程,使其评价方法体系也日趋完善。国内随着赵同谦^[6]等人首次将水生态系统作为整体进行综合评价以来,水生态系统服务功能内涵的探讨及其价值量的评价已成为生态学、环境经济学的热点和前沿课题。因水动力特征、空间分布和所处生态阶段的差异,不同水生态系统类型的服务内涵、作用方式与强度都存在较大差别。目前国内已相继开展了近海^[7]、河流^[8]、水库^[9]、湖泊^[10]、城市湿地^[11-12]等不同类型水生态系统的服务功能价值研究,很好地揭示了这些类型水生态系统功能的内涵和特征。然而,目前关于广泛分布于长江中下游沿江滨湖带的圩区水生态系统服务价值的探讨鲜有涉猎,其在流域尺度内空间差异性特征的分析更是一个亟待加强研究的薄弱环节。

圩区(圩田、圩垸)是在接近河流、湖泊的低洼地区周围修筑堤防而形成的自然和人工生态系统的复合体^[13],可有效减少低洼农田遭受旱涝灾害的威胁,保证了圩内工农业生产和居民生活的有序进行。圩内的河流、坑塘、鱼塘(人工养殖水面)等水域是维持圩区整体生态系统稳定、发展的生命线,直接制约着圩区其它生态系统机能的发挥。目前,在我国人口稠密,经济发达的太湖流域共有圩区面积 $10\,630.91 \text{ km}^2$,占流域总面积的 28.81%,成为该流域重要的地理单元。因此,圩区水生态系统服务功能的评估与分析有助于深化认识圩区水生态系统在流域生态系统体系中的地位和作用,对加强流域的水环境管理决策也具有一定的指导意义。

不同于圩外的自然流动水体,圩内水体通过人工控制与外界建立水力联系,促使其水分循环和水生态服务功能表现出自身的独特性。本研究以水生态服务功能理论为指导,构建圩区水生态服务功能评价指标体系,利用遥感解译数据、水文气象资料和实地调研数据,对太湖流域圩区水生态系统的供给、调节和维持功能及其生态经济价值进行了估算与分析,并探讨了流域内圩区水生态系统服务功能的空间分布特点,以期

域水资源的分区管理、圩区生态系统的优化调控和土地资源的合理配置提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于长江中下游的太湖流域,处在长江与杭州湾之间,西依天目山、茅山,东至东海,介于 $119^{\circ}11'—121^{\circ}53' E, 30^{\circ}28'—32^{\circ}15' N$,跨江苏、浙江、上海、安徽等三省一市,总面积 $3.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地形呈西高东低,周边高中心低的碟状盆地,西部主要为丘陵山地,其余为平原部分。为更好地分析流域内部圩区服务功能的区域异质性,依据太湖流域的地势和水系河网特点,将太湖流域划分为湖西区、浙西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、太湖区、杭嘉湖区、浦东区、浦西区等8个分区(图1)。其中,湖西区、浙西区和太湖区为上游区;其余为下游区。各分区土地面积、水文、地势情况详见文献^[14-15]。全流域分布有大小圩区2000多个,尤以流域东南部分布最为密集。

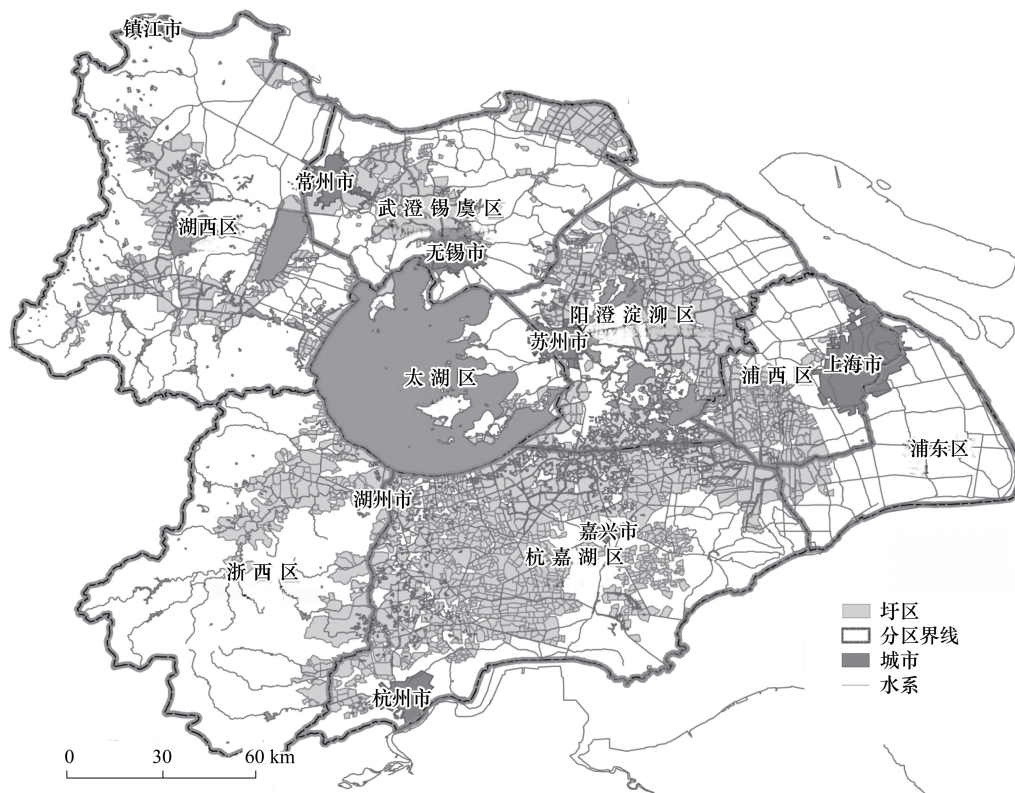


图1 太湖流域圩区分布图

Fig.1 The distribution of polders in Taihu Basin

2 研究方法

2.1 圩区信息提取

根据太湖流域圩区的实际土地利用特点和遥感影像解译土地类型的可识别性,将太湖流域圩区划分为水生生态系统和陆地生态系统,其中水生生态系统细划分为河流、坑塘、鱼塘(人工养殖水面)等3个生态子系统。各生态系统类型分布范围和面积的具体确定方法是首先依据水利部门的普查数据确定圩区分布范围,并将界线标注在1:50000的地形图上,进行矢量化得到研究区内2534个圩区的分布信息。然后采用2009年全色波段分辨率为2.5m的ALOS遥感影像,经过辐射校正、几何精纠正、图像增强等预处理过程,得到研究区RGB假彩色图像。在已有各圩区分布范围、界线的基础上,结合野外调查的GPS点地表特征情况,建立图像解译标志,采用监督分类方法确定每个圩区内的具体土地利用类型,并利用复查的地面验证点进行验证,精度达到

78%。最后将获得的各土地斑块信息在 Arc Gis 10.0 平台下进行面积统计分析。

此外,于 2009 年 4 月 20 日—5 月 10 日,7 月 5 日—7 月 25 日对太湖流域水生态状况分别进行了平水期和丰水期的两次实地调查,调查点位共计 78 个,基本覆盖圩区的主要分布范围。此次调查包括水生物状况、水位、水体叶绿素浓度、土壤理化性质等项目。其中,水生物状况调查涉及浮游动物、浮游植物、水生维管束植物、底栖动物、鱼类等五大类水生生物。

2.2 水生态系统服务功能及其价值估算

根据生态服务功能价值理论^[16]和太湖流域圩区水生态系统的实际特点^[15],建立包含水源供给、产品供给、水量调节、水源储存、水质净化、气温调节、固碳释氧、滞涝能力、文化科研、生物多样性维持等指标的太湖流域圩区水生态服务功能价值评价体系。其中,水源供给、产品供给可在市场上直接交易,称为直接使用价值,其余功能无法在常规市场上交易,称为间接使用价值。

2.2.1 水源供给

圩区水域的供水功能主要取决于水体正常蓄水量与最小生态环境需水量之差。不考虑水质因素,计算圩区理论供水能力的公式如下:

$$W_s = S_w dn \quad (1)$$

式中, W_s 为年可供水量(m^3); S_w 为圩内水域面积(m^2); d 为河道正常蓄水位与最小生态环境需水量对应的水位之差,均取值为 $0.4 m$ ^[17]; n 为水体复蓄次数,指一年内河道重复蓄水排水的频率,取平水年份 $n = 1.5$ ^[18]。根据《中国统计年鉴 2010》及《2009 年中国水资源公报》确定供水单价为生活用水和农业生产用水的平均值 $0.50 元/m^3$,由此可计算区域供水价值。

2.2.2 产品供给

太湖流域水产养殖业发达,水产品丰富多样,考虑到数据的可获取性,仅对淡水养殖业的水产品产量进行估算。选取各分区内的圩区率最高的县市淡水养殖水产品产量与人工养殖面积数据计算出单位养殖面积的淡水产品产量,将此作为各分区圩内的养殖水产品单产量(表 1),然后根据圩内人工养殖水面面积求出各分区的淡水养殖水产品总产量。按流域内水产品种类分布和市场价格确定淡水产品均价为 $7000 元/t$,使水产品总量折算为货币价值形式。

表 1 各分区服务功能的相关参数值

Table 1 The parameters of aquatic ecosystem services of each subregion

项目 Item	湖西区	浙西区	武澄 锡虞区	阳澄 淀泖区	太湖区	杭嘉湖区	浦东区	浦西区
单位面积水产品产量 Average output/(t/km^2)	399	674	516	540	914	823	812	880
平均水深 Average water depth/m	2.03	3.53	1.86	1.38	1.50	2.02	1.37	1.97
叶绿素 a 浓度/(mg/m^3) Concentration of chlorophyll a	18.21	19.11	19.31	26.93	28.67	25.93	27.44	26.82
SHDI (Shannon's diversity index)	0.875	1.642	0.836	0.803	1.605	2.209	1.902	2.399

2.2.3 水量调节

圩内河流、坑塘等水生态系统通过水源涵养功能,可分洪削峰,补充地下水,实现流域水量在空间和时间上的再分配。计算圩区水生态系统的水量调节功能公式为:

$$R_w = S_w \Delta h \quad (2)$$

式中, R_w 为调节水量(m^3); Δh 为最高水位与平水位之差即水位绝对变幅(m),根据实地调查,太湖流域圩区的水位绝对变幅平均值为 $0.5 m$ 。水量调节经济价值采用影子替代工程法估算,2008 年水库单位库容造价 $7.03 元/m^3$ ^[9],根据 2009 年全国固定资产投资价格指数为 97.6(上年 = 100),2009 年水库单位库容造价则为 $6.85 元/m^3$ 。

2.2.4 水源储存

$$W_s = S_w h_w \quad (3)$$

式中, W_s 为水源储存量(m^3); h_w 圩区水域水深(m)。据此次太湖流域圩区水生态状况调查数据, 计算出各分区平均水深(表 1)。依据 2009 年的单位库容造价 6.85 元/ m^3 , 评估其水源储存经济价值。

2.2.5 水质净化

圩区水生态系统通过对径流中含氮、磷污染物质的分散、吸附、氧化还原等物理、化学反应, 降低水体中的氮磷含量, 实现净化水环境的功能。其计算公式如下:

$$N_w = Q_N S_w \beta_N \quad (4)$$

$$P_w = Q_P S_w \beta_P \quad (5)$$

式中, N_w 、 P_w 分别为氮、磷净化量(t); Q_N 、 Q_P 分别为单位面积氮、磷污染物入河量(t/km^2), 其计算利用 2009 年《太湖流域及东南诸河水资源公报》中的四省市污水排放量和水域面积, 按照太湖流域污水平均氮、磷含量 0.004% 和 0.0008%, 求得各省圩区内的单位面积氮、磷污染物排放量(图 2); β_N 、 β_P 分别为氮、磷去除率(%), 流域内圩区河流和沟渠的平均氮、磷去除率分别为 32.8%、50.1%^[20]。参考生活污水总氮 1500 元/ t , 总磷 2500 元/ t 的处理成本^[11] 对圩区水质净化功能价值量进行估算。

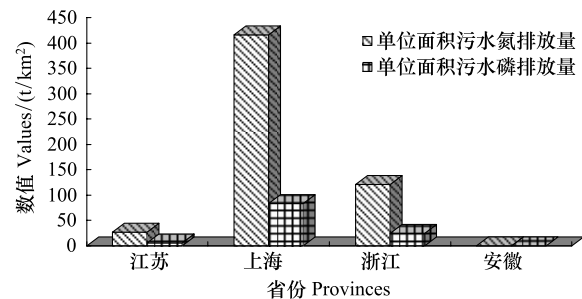


图 2 各行政区单位面积污水氮、磷排放量

Fig.2 The emissions of sewage nitrogen and phosphorus per unit area of each administrative district

2.2.6 夏季气温调节

水面较陆地具有较大的比热容量, 蒸发强度一般大于陆面 20% 左右^[18], 因此夏季圩区水体可通过蒸发耗热来降低气温, 增加湿度, 调节局部地区的气候。利用水面蒸发相对陆面蒸发多消耗的热量能够使地面以上 100 m 大气增温多少来计算水面对气温的降温作用。具体而言, 在不考虑圩区与圩外大气热量交换的情况下, 对一个水面率为 α 的区域, 圩区水体的存在相比陆面对夏季圩区日气温的降低值 ΔT ($^{\circ}C$) 计算如下:

$$\Delta T = \frac{0.2L_w E_w \times 10^3 \alpha}{100q_a} \quad (6)$$

式中, L_w 为汽化潜热, 即 1 g 水蒸发需要消耗的热量, 气温 25 $^{\circ}C$ 取值 2468.6 J; E_w 为水面日蒸发量(mm/d)。根据《江苏水文手册》观测数据, 可知夏季 7—8 月日平均器测蒸发量为 4.5 mm/d 。以太湖站观测值为参考, 流域内 7—8 月水面蒸发折算系数取值 0.96; α 为圩区水面率(%); q_a 为空气的比热容, 1260 $J \cdot m^{-3} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ 。一般情况下, 面积 100 m^2 的房间气温下降 1 $^{\circ}C$ 需消耗电量 0.2 $kW \cdot h$ ^[18]。按照太湖流域 2009 年平均电价 0.5283 元 $kW^{-1} \cdot h^{-1}$ 的标准, 可计算气候调节功能的单位价值 0.00106 元 $^{\circ}C^{-1} \cdot m^{-2}$ 。

2.2.7 固碳释氧

圩区水生态系统中的浮游植物通过光合作用不断吸收大气中的 CO_2 , 产生 O_2 , 将生成的有机物质积累到自身体内, 从而调节大气成分。因数据和研究条件的限制, 本文不考虑水生生物对浮游植物的消费量, 采用调查的叶绿素现存量估计浮游植物初级生产力:

$$T_c = S_w \cdot NPP_{em} = S_w (34.52chl-a + 222.9) \quad (7)$$

式中, T_c 为固碳总量(mg/d); NPP_{em} 为浮游植物初级生产力($mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1} \cdot C$), 根据张运林等^[21] 建立的利用叶绿素 a 浓度预测太湖流域水体初级生产力的经验模型计算得到。Chl-a 为表层叶绿素 a 浓度(mg/m^3), 由此次太湖流域水生态调查得到(表 1)。借用环境经济通用的瑞典碳税率 150 美元/ $t(C)$ ^[22], 按 2009 年人民币对美元平均汇率 6.83 进行换算, 则生态系统的固碳价格为 1024.5 元/ t 。释氧价值按植物生产 1 g 干物质可释放 1.19 g O_2 的规律和工业制氧成本为 400 元/ t 标准计算^[12]。

2.2.8 滞涝能力

圩区水网密布,交错纵横,河道、坑塘等水域的正常水位与允许的最高水位之间的差距为滞留洪水给予了一定的空间。参考文献^[13,18],圩区水域的滞涝作用可以减少单位面积上的排涝装机容量 M 计算公式为:

$$M = \frac{h\alpha}{3.6Tt} \quad (8)$$

式中, h 为水面净滞涝水深(mm),根据该区的实际情况和《江苏省水文手册》设置参数如下,水田净滞涝水深等于水稻耐淹水深(350 mm)减去水稻适宜水深(50 mm),即 300 mm; α 为圩区水面率; T 为排水天数,取水稻的耐淹历时均值 3 d; t 为排水每天开机小时数,取值为 22 h。由此,可得流域圩内水体的滞蓄作用可减少单位面积圩区的排涝装机容量为 $0.17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$,水体的滞涝功能总量为 $4.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。采用机会边际成本法转换为经济价值,根据排涝装机容量的成本为单位流量造价 100 万元 $\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ^[18],可估算出其滞涝功能的价值量。

2.2.9 文化科研教育价值

圩区水生态系统既是太湖流域重要的湿地系统,又是圩田农业生产的关键组成部分。其独特的水分、营养物质循环与生态结构,使其成为天然的农学、生态学、水文水利学等学科的天然实验室,具有重要的文化科研价值。取中国单位面积湿地的平均文化科研价值 382 元/ hm^2 ^[23] 和全球湿地生态系统科研文化功能价值 881 美元/ hm^2 ^[24] 的平均值 3199.62 元/ hm^2 作为流域圩区水生态系统的科研价值参数,据此可计算出各分区文化科研价值量。

2.2.10 生物多样性维持

水生物种的丰富度、密度、结构组成对于环境状况及变化一般具有较强的敏感性和指示性,能够较好地反映区域性生境质量的优劣,因此选择水生生物的多样性指数作为评价水生态系统对维持生物多样性能力大小的指标。水生生物的多样性指数 SHDI (Shannon's Diversity Index) 计算方法如下:

$$\text{SHDI} = - \sum_{k=1}^m (P_k \times \ln P_k) \quad (k=1, 2, 3, \dots, m) \quad (9)$$

式中, P_k 为第 k 个种的相对多度,由该物种数量与所有物种数量的比值求得; m 为研究区内的所有种类数,包含浮游动物、浮游植物、水生维管束植物、底栖动物、鱼类等五大类水生生物; SHDI 为香农多样性指数,数值越大,说明生物的多样性越大。参考 Costanza 等人的研究成果,较佳的沼泽或泛滥平原提供栖息地或避难所这一服务功能的年生态效益为 43900 美元/ km^2 ^[24],折合人民币 299837 元/ km^2 。为更好地比较流域内生物多样性的空间差异性,将圩区生境最佳,生物多样性指数最大的分区年生态效益确定为 299837 元/ km^2 ,各区生境维持经济价值则为:

$$D_i = \frac{\text{SHDI}_i}{\text{SHDI}_{\max}} \times 299837 \quad (10)$$

式中, D_i 为分区 i 的生境维持功能价值量; SHDI_i 为计算得到的分区 i 的生物多样性指数(表 1); $\text{SHDI}_{\max}$ 为流域内生物多样性指数的最大取值。

3 结果与分析

3.1 圩区水生态系统类型的分布

遥感影像的解译结果表明:太湖流域的圩区水生态系统面积 1434.21 km^2 ,占圩区总面积的 13.49%。其中,人工养殖水面所占比例达到 9%,河流和坑塘则分别仅占到 3%、2%(图 3)。在 8 个分区中,阳澄淀泖区的圩区水面积最大(429.24 km^2),占流域圩区水域总面积的 29.93%;最小的为浦东区(8.66 km^2),仅占 0.60%

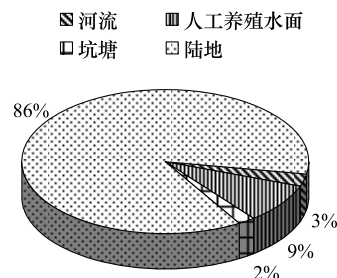


图 3 太湖流域圩区生态系统类型构成

Fig.3 The proportions of ecosystem types of polder

(图 4)。各分区的圩区水生态系统均以人工养殖水面占主导地位,平均占到水域面积的 66.03%。浦东区圩区的水域面积虽最小,但人工养殖水面比例却占到 97.19%,这是由于该区作为上海市的主要农副产品供应基地,充分利用圩区内有限的水面资源,围绕上海中心城区大力发展商品淡水养殖业,使养殖水面占圩区总水面比例达到最大。圩内河流受人工控制,流量和和河床宽度较小,多为小型河流,所以各分区河流面积所占比例大多在 15%—30%之间。坑塘面积比例最小,流域平均比例为 13.30%。

3.2 圩区水生态系统服务功能

太湖流域整体圩区的水生态系统年可为周围居民生产生活供给水量 $8.61 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,水产品 $58.74 \times 10^4 \text{ t}/$

a,调节水量 $7.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,贮存水量 $27.12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,净化总氮 $3.62 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$ 、总磷 $1.10 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$,滞纳洪水 $4.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,固碳 $129.08 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$,释放氧气 $153.60 \times 10^4 \text{ t}/\text{a}$,生物多样性功能指数 1.34,夏季可降低圩区气温 $2.27 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 2)。水量供给、水产品产量、水量调节、水源储存、净化水质、生物多样性维持等方面功能均以杭嘉湖区最大,滞涝功能、固碳释氧量以阳澄淀泖区最强,气温调节则以太湖区最大。但总体来看,在各项生态服务功能中,杭嘉湖区、阳澄淀泖区、湖西区位居前列。杭嘉湖区地处杭嘉湖平原,水网密集,水位较深,圩区农业、淡水养殖经济发达,水质相比流域西北部较好,水生生物种类繁多,促使整体的生态服务功能较强。阳澄淀泖区分布有太湖、阳澄湖和淀山湖等大型湖泊的水系,致使圩区水面率达到 22.36%,且圩内的水域面积在各分区中最大,使得该区的水生态功能量较大。湖西区位于河流上游,水质优良,且漏湖、长荡湖水系密布,圩内水域分布广泛,其生态服务功能量可观。

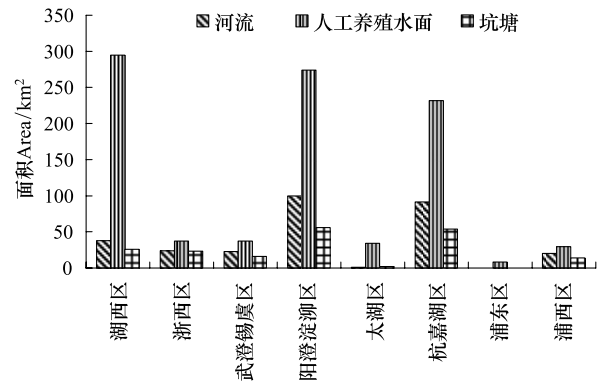


图 4 太湖流域不同分区的圩区水生态系统构成

Fig.4 The aquatic ecosystem types area of polder of each subregion

表 2 各分区水生态系统服务功能总量

Table 2 The total aquatic ecosystem services of polder in Taihu basin

项目 Item	湖西区	浙西区	武澄锡虞区	阳澄淀泖区	太湖区	杭嘉湖区	浦东区	浦西区	合计 Total
水源供给 Water supply / $\times 10^8 \text{ m}^3$	2.15	0.50	0.46	2.58	0.22	2.26	0.05	0.38	8.61
水产品供给 Aquatic products / $\times 10^4 \text{ t}$	11.76	1.11	1.91	18.46	3.12	19.08	0.68	2.61	58.74
水量调节 Water regulation / $\times 10^8 \text{ m}^3$	1.79	0.42	0.38	2.15	0.19	1.89	0.04	0.32	7.17
水源储存 Water storage/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	7.26	2.96	1.42	5.92	0.56	7.62	0.12	1.26	27.12
净化总氮 Nitrogen reduction/ $\times 10^4 \text{ t}$	0.32	0.33	0.07	0.38	0.03	1.49	0.12	0.87	3.62
净化总磷 Phosphorus reduction/ $\times 10^4 \text{ t}$	0.10	0.10	0.02	0.12	0.01	0.46	0.04	0.27	1.11
滞涝功能 Flood control/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	1.07	0.25	0.23	1.29	0.11	1.13	0.03	0.19	4.30
气温调节 Temperature regulation/ $^\circ\text{C}$	4.43	1.21	0.96	3.76	6.06	1.64	0.88	1.49	2.27
固碳 Carbonium fixation/ $\times 10^4 \text{ t}$	23.62	5.54	5.03	39.92	3.68	35.08	0.80	5.95	129.08
释氧 Oxygen production/ $\times 10^4 \text{ t}$	28.11	6.59	5.98	47.50	4.38	41.75	0.95	7.08	153.60
生物多样性维持 Biodiversity maintenance	0.88	1.64	0.84	0.80	1.61	2.21	1.90	2.40	1.34

3.3 圩区水生态系统服务价值

太湖流域圩区水生态系统服务功能总价值 $325.93 \times 10^8 \text{ 元}/\text{a}$,各项服务功能价值量排序为水源储存>水量调节>水产品供给>滞涝功能>固碳>释氧>科研文化>水源供给>生物多样性维持>净化总氮>净化总磷>气温调节。其中,最大的水源储存功能($185.84 \times 10^8 \text{ 元}/\text{a}$)价值占总价值的 57.02%,表明圩区作为淡水资源的天然储存地,在维持生态系统结构、促进其功能发挥上作用显著;其次为水量调节占总价值的 15.07%,说明圩区水

域分洪削峰,有效调节地表径流和地下水量,对减少该区旱涝灾害的频率和强度具有重要的意义。净化总磷和气温调节功能相对较小,均仅占 0.08%左右。因各分区的圩区水生态系统面积大小不同(图 4),太湖流域圩区水生态服务功能价值总量呈现出杭嘉湖区>阳澄淀泖区>湖西区>浙西区>武澄锡虞区>浦东区>太湖区>浦东区的特点。其中,阳澄淀泖区水生态系统面积虽比杭嘉湖区多 52.02 km²,但由于其水位低于后者 46.38%,造成水源储存价值量远小于后者,从而形成阳澄淀泖区总价值量低于杭嘉湖区 10.20%的特征。

表 3 各分区水生态系统服务功能价值总量($\times 10^8$ 元/a)

Table 3 The total value of aquatic ecosystem services of polder in Taihu basin

项目 Item	湖西区	浙西区	武澄 锡虞区	阳澄 淀泖区	太湖区	杭嘉 湖区	浦东区	浦西区	合计 Total
水源供给 Water supply	1.07	0.25	0.23	1.29	0.11	1.13	0.03	0.19	4.30
水产品供给 Aquatic products	8.23	0.77	1.34	12.93	2.18	13.35	0.48	1.83	41.12
水量调节 Water regulation	12.26	2.88	2.61	14.70	1.28	12.92	0.30	0.22	49.13
水源储存 Water storage	49.77	20.31	9.70	40.58	3.82	52.21	0.81	8.63	185.84
净化总氮 Nitrogen reduction	0.05	0.05	0.01	0.06	0.005	0.22	0.02	0.13	0.54
净化总磷 Phosphorus reduction	0.02	0.03	0.01	0.03	0.003	0.11	0.01	0.07	0.28
滞涝功能 Flood control	4.52	1.06	0.96	5.42	0.47	4.76	0.11	0.81	18.11
气温调节 Temperature regulation	0.06	0.01	0.01	0.08	0.01	0.07	0.002	0.01	0.25
固碳 Carbonium fixation	2.42	0.57	0.51	4.09	0.38	3.59	0.08	0.61	13.22
释氧 Oxygen production	1.12	0.26	0.24	1.90	0.18	1.67	0.04	0.28	6.14
科研文化 Research and culture	1.14	0.27	0.24	1.37	0.12	1.21	0.03	0.20	4.59
生物多样性维持 Biodiversity maintenance	0.39	0.17	0.08	0.43	0.07	1.04	0.02	0.19	2.40
总计 Total	81.07	26.63	15.95	82.88	8.62	92.30	1.92	15.14	325.93

3.4 圩区水生态系统服务的空间差异

流域内的圩区单位面积水生态功能价值平均为 22.73 元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$,其中水源储存、水量调节、水产品供给和滞涝功能的单位价值量较大,共占到总价值的 90.28%。而其余功能项均小于 1 元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$,仅占总价值的 10%左右。太湖区的水产品供应和固碳释氧,湖西区的水源储存,浦东区、浦西区的净化总氮、总磷,浦西区的生物多样性维持功能单位面积价值量最大。

太湖流域单位面积水生态服务价值存在较大的空间异质性,单位面积价值最大的浙西区(31.72 元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$)比最小的阳澄淀泖区(19.31 元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$)高 64.27%(表 4)。从整体来看,流域的北部地区(湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、浦东区)水生态系统单位面积价值均低于流域平均水平,而南部地区(浙西区、杭嘉湖区)高于平均水平,同时表现出流域西高东低的特点。流域北部、东部沿海的沪苏锡常产业带经济发达,城市化、工业化等人类活动对圩区水生态系统干扰性强,水位下降严重,景观破碎化程度高,水环境质量恶化,水生生物多样性减小,造成水生态系统服务价值效益的下降。流域南部、西部地区尤其浙西区地势较高,人口密度低,其圩区水生态系统受外界干扰少,水质良好,水位高,景观完整度高,水生物种丰富,使其成为流域水生态服务价值的高值区。

4 结论与讨论

1) 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值为 325.93×10^8 元/a,其中供给功能(水源供给、水产品供应)价值占 13.93%,调节功能(水量调节、水源储存、净化水质、调蓄洪水、气温调节、固碳释氧)占 83.92%,文化功能占 1.41%,支持功能(生物多样性维持)占 0.74%。流域内圩区水生态系统单位面积服务价值平均为 22.73 元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$,且存在较大的空间异质性:整体呈现出南高北低,西高东低的分布特点。

2) 太湖流域圩区水生态系统服务功能的直接价值为 45.42×10^8 元/a,而间接价值却高达 280.52×10^8 元/a。因为一方面水生态系统支持着整个自然生态系统结构、过程与区域生态环境功能的发挥,其生态调节、维持功

能内涵丰富,价值量巨大;另一方面圩区水生态系统受人工闸门控制,无法与圩外水体进行自然交换,水流缓慢,河窄水浅,相对于其它地表水体缺少航运、水力发电、休闲娱乐等直接价值功能,使其直接价值所占比例远低于全国平均水平的 67.94%^[6]。人们在圩区水资源利用上往往只注重水生态系统的直接功能,而忽视了水对生态系统的调节、支持和文化功能,结果造成过度开发利用水资源的短期经济行为使生态环境遭到严重破坏,导致生态系统服务功能价值的重大损失。因此,相关部门应均衡考虑各项水生态系统的服务功能,在水环境承载力范围内对圩区水生态系统进行合理规划开发,达到经济、社会与环境的协调可持续发展。

表 4 各分区水生态系统服务单位面积价值量(元 $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

Table 4 The value of aquatic ecosystem services per unit area of polder in Taihu basin

项目 Item	湖西区	浙西区	武澄 锡虞区	阳澄 淀泖区	太湖区	杭嘉 湖区	浦东区	浦西区	流域平均
水源供给 Water supply	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
水产品供给 Aquatic products	2.30	0.92	1.76	3.01	5.87	3.54	5.52	2.86	2.87
水量调节 Water regulation	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43
水源储存 Water storage	13.91	24.19	12.74	9.46	10.28	13.84	9.39	13.50	12.96
净化总氮 Nitrogen reduction	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.06	0.20	0.20	0.04
净化总磷 Phosphorus reduction	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.10	0.10	0.02
滞涝功能 Flood control	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
气温调节 Temperature regulation	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
固碳 Carbonium fixation	0.68	0.68	0.68	0.95	1.01	0.95	0.94	0.95	0.92
释氧 Oxygen production	0.31	0.31	0.31	0.44	0.47	0.44	0.44	0.44	0.43
科研文化 Research and culture	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
生物多样性维持 Biodiversity maintenance	0.11	0.21	0.10	0.10	0.20	0.28	0.24	0.30	0.17
总计 Total	22.65	31.72	20.94	19.31	23.18	24.47	22.16	23.69	22.73

3) 本文首次对太湖流域的圩区水生态系统服务价值进行了评估,并分区探讨了其空间差异性特点,有利于直观地定量表述圩区水生态系统在流域地表物质循环和能量交换中的价值以及在促进经济社会发展过程中所发挥的重要作用。同时,也为在进行流域水生态系统健康管理规划和生态修复时,根据各分区的实际情况进行差别化管理,抓住各区存在的主要水环境问题提供科学指导。本文只对圩区水生态的服务价值做了静态评估,然而伴随流域土地利用类型性质的时间变化,水生态系统服务价值在人类经济活动等外在压力下具有鲜明的动态变化特点。所以,基于多期遥感影像和长时间序列的气象水文观测数据研究太湖流域圩区水生态系统服务功能的时空演变特征与趋势,将是下一步研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Brown T C, Taylor J G, Shelby B. Assessing the direct effects of streamflow on recreation: a literature review. Water Resources Bulletin, 1991, 27(6): 979-989.
- [3] Bingham G, Bishop R, Brody M, Bromley D, Clark E, Cooper W, Costanza R, Hale T, Hayden G, Kellerth S, Norgaardi R, Nortonj B, Paynek J, Russelll C, Suter G. Issues in ecosystem valuation: improving information for decision making. Ecological Economics, 1995, 14(2): 73-90.
- [4] Henry R, Ley R, Welle P. The economic value of water resources: the Lake Bemidji survey. Journal of the Minnesota Academy of Science, 1988, 53(3): 37-44.
- [5] Lant C L, Tobin G A. The economic value of riparian corridors in cornbelt floodplains: a research frame work. Professional Geographer, 1989, 41(3): 337-349.
- [6] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 魏彦昌. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443-452.
- [7] 吴姗姗, 刘容子, 齐连明, 梁湘波. 渤海海域生态系统服务功能价值评估. 中国人口资源与环境, 2008, 18(2): 65-69.
- [8] 张振明, 刘俊国, 申碧峰, 刘培斌, 魏伟, 高鹏杰, 张艺. 永定河(北京段)河流生态系统服务价值评估. 环境科学学报, 2011, 31(9):

- 1851-1857.
- [9] 韩慧丽, 靖元孝, 杨丹菁, 肖林, 李国梁, 詹重贵, 王安利, 孙儒泳. 水库生态系统调节小气候及净化空气细菌的服务功能—以深圳梅林水库和西丽水库为例. 生态学报, 2008, 28(8): 3553-3562.
- [10] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 解家安, 马兰, 张涛. 青海湖湖泊水生态系统服务功能的使用价值评估. 生态经济, 2013, (9): 163-180.
- [11] 王国新. 杭州城市湿地变迁及其服务功能评价: 以西湖和西溪为例 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [12] 刘韬, 陈斌, 杜耘, 江炎生, 魏显虎. 洪湖湿地生态系统服务价值评估研究. 华中师范大学: 自然科学版, 2007, 41(2): 304-308.
- [13] 高俊峰, 毛锐. 太湖平原圩区分类及圩区洪涝分析—以湖西区为例. 湖泊科学, 1993, 5(4): 307-315.
- [14] 高俊峰, 闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响. 地理学报, 2002, 57(2): 194-200.
- [15] 高俊峰, 高永年. 太湖流域水生态功能分区. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 52-73.
- [16] 李文华. 中国当代生态学研究—生态系统管理卷. 北京: 科学出版社, 2013.
- [17] Gao J F, Gao Y N, Zhao G Z, Hörmann G. Minimum ecological water depth of a typical stream in Taihu Lake Basin, China. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 136-142.
- [18] 李菲菲. 平原圩区水体生态服务功能定量分析方法研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [19] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 尹云鹤, 赵东升. 三江源区生态系统服务间接使用价值评估. 自然资源学报, 2013, 28(1): 38-50.
- [20] 胡颖. 河流和沟渠对氮磷的自然净化效果的试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [21] 张运林, 冯胜, 马荣华, 刘明亮, 秦伯强. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算. 湖泊科学, 2008, 20(3): 380-388.
- [22] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 王淑军, 王琦, 王仁卿. 昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2009, 29(1): 523-531.
- [23] 许妍, 高俊峰, 黄佳聪. 太湖湿地生态系统服务功能价值评估. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 646-652.
- [24] Costanza R, Arge R D, Groot R d, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Oneill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, vanden Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.