

太湖河湖水系连通需求评价初探*

徐慧, 雷一帆, 范颖骅, 吕多智

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 水系连通需求分析是河湖水系连通战略研究的重要内容。水系连通需求指人类社会经济发展对水资源调配、防洪排涝、改善生态环境等方面的需求及对河湖水系健康的维护, 它源于水系能够提供各种水生态系统服务功能的生态学特性。通过分析水系连通需求、水生态系统服务功能和水系连通工程之间的内在关系, 认为水系连通需求评价可转化为对水生态系统服务功能的评价。运用水当量评价方法, 建立了河湖水系连通需求评价的方法体系, 并以河网地区的典型代表——太湖为例, 定量评价了太湖在水资源调配、调蓄洪水、水环境净化和维持生境等方面的连通需求。结果表明, 太湖水系年均连通需求最大的是净化入湖废污水需水量, 其次为水资源调配需水量, 而太湖调蓄洪水的需求减少; 湖水自身净化需水量较大, 且为一次性需水。水环境净化的需求需要通过降低污染物入湖量, 进行湖泊生态修复等主要措施以及引清水增加环境容量这一辅助连通措施共同完成。水系连通需求的定量评价可为水系连通战略及工程的规划设计提供理论基础。

关键词: 水系连通需求; 水生态系统服务功能; 水当量法; 太湖

Assessment of the interconnection demand of the river-lake system in the Lake Taihu basin

XU Hui, LEI Yifan, FAN Yinghua & LÜ Duozhi

(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

Abstract: River-lake system interconnection demand is one of the key elements among the research of river-lake system interconnection strategy. It reflects the demand of the social-economic development on water diversion, flood regulation, eco-environment improvement and the maintenance of the health of river-lake system. It is based on the inherent ecological properties that a drainage system can provide various water ecosystem services to a river-lake system. Since the river system, river system interconnection demand, the water ecosystem services, and river system interconnection engineering are closely interconnected, the methods which have been adequately studied for assessing the water ecosystem services can be applied to the assessment of river system interconnection demand. So methodologies for evaluation of river system interconnection demand are established by applying the water equivalent method. With a long historical practices of river system interconnection in Lake Taihu watershed, which is a typical and emergent floodplain river network area in eastern China, demanding on Lake Taihu river system interconnection is assessed in this study. The main demand includes water resource diversion, flood regulation, water purification, and habitat sustainment. Purification water demand per year of retained pollutants in the lake is $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$, ranked the first place. Water resource diversion demand is $3.0 \times 10^9 - 4.2 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$, ranked the second place, while the demand of flood regulation of the lake is decreased by $7.2 \times 10^8 - 10.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. Purification demand of the water from the lake is $8.14 \times 10^9 \text{ m}^3$, and is consumed once only; the habitat maintenance water demand is $3.58 \times 10^9 \text{ m}^3$. The results show that water environment improvement demand is tremendous. To ease the stress, countermeasures such as control of the pollutant entering into the lake, desilting and dredging the lake, and ecological restoration of the lake water need to be applied firstly, then the diversion of clean water as an assisting way. There are different corresponding interconnection ways for each demand, and it is necessary to confirm the ratio of each interconnection project.

Keywords: River system interconnection demand; water ecosystem services; water equivalent method; Lake Taihu

* 水利部公益性行业科研专项项目(201201072, 201001030)资助。2012-07-18 收稿; 2012-12-11 收修改稿。徐慧, 女, 1969年生, 博士, 副教授; E-mail: njxh@hhu.edu.cn.

我国河湖水系连通的生产实践经验丰富,就连通的目标来看,目前正经历着从满足水资源调配、防洪抗旱到修复和改善水生态环境的提升。针对我国当前面临的一系列水资源问题和挑战,水利部提出了河湖水系连通战略。随后,一些学者分别对水系连通的定义、特征、构成要素、研究框架、理论以及面临的问题与挑战等进行了探讨^[1-3]。根据水系连通战略目标,河湖水系连通的重点任务是通过必要的水工程,建立水体之间的水力联系,提高水资源统筹调配能力,改善河湖生态环境,增强抵御水旱灾害能力,实现水资源可持续利用、人水和谐^[1]。同时,水系连通的负面影响也受到了关注,如夏军等提出了河湖连通对生态环境带来的5方面的负面影响^[4];对三峡工程全面竣工正常运行后的预评估认为,三峡工程对河流生态系统服务功能存在防洪、发电、旅游、减少有害气体排放等6项正面影响和库区污染、泥沙淤积、水库淹没、对生物的影响和对河流生态系统的占据5项负面影响^[5]。尽管水系连通工程存在一定的负面影响,但在社会经济高速发展的形势下,仍需要进一步发挥水系连通对社会经济发展的基础支撑作用和改善人水关系的纽带作用。

太湖流域是典型的平原河网地区,水系连通实践由来已久。该流域经济发达,城市化、工业化水平高,经济社会发展对防洪安全、供水安全和生态安全的要求越来越高。实施河湖水系连通对于提高流域及区域水资源配置能力、防洪排涝能力、修复水生态、改善水环境都具有重要意义。自然形成的江河湖水系经过长期的水利建设与管理已经演变成“自然—人工”复合水系,水系连通格局不断被改造,水系功能也发生了从传统的供水、防洪、除涝、抗旱、航运到当前的生态环境、人水和谐乃至水文化等人水格局关系的转变,这种演变反映了不同时期不同区域对水系功能及连通的不同需求,使得水系连通实践表现出时空演变的特征。水系连通需求是河网地区水系连通的关键问题之一^[6],而目前关于水系连通需求分析的研究成果还不多见。本文在分析探讨水系连通工程、水系连通需求以及水生态服务功能三者相互关系的基础上,结合河湖水系连通的战略目标和实践的要求,归纳了水系连通需求的内涵,参照水生态系统服务功能的评价方法,建立了水系连通需求评价的方法体系,以太湖为典型区,评价了太湖水系的连通需求,为太湖水系连通实践提供理论参考。

1 水系连通需求评价方法

根据水系连通战略目标,水系连通需求是指人类社会经济发展对水资源供给、防洪排涝、改善生态环境等方面的需求及对河湖水系健康的维护。无论是自然水系还是自然—人工复合水系都具有一定的功能,这种功能来源于水系所固有的发挥生态系统服务功能的生态学特性。水生态系统服务功能是指水生态系统及其生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,分为提供产品、调节功能、文化功能和生命支持功能4大类^[7]。水生态系统服务功能同时考虑了生态系统对自然与人类两方面的作用,有社会经济服务功能和自然生态服务功能之分^[8]。水系连通工程的建设也大多是围绕这两大类功能进行的。因此,水生态系统服务功能是水系连通需求的基础,水系连通需求本质上是不同利益主体对水生态服务功能的需求,其驱动力为社会经济的发展和与自然水系的保护意识的不断提高,水系连通需求本身具有时空演变特征。水系连通工程是实现连通需求的重要途径和措施。人类通过建设各种水系连通工程促使水生态系统服务功能发生变化,满足各方面的需要。水利发展的历程就是人类通过各种水利工程改变水生态系统服务供应水平的过程。水系连通需求、连通工程和水生态系统服务功能相互关系见图1。

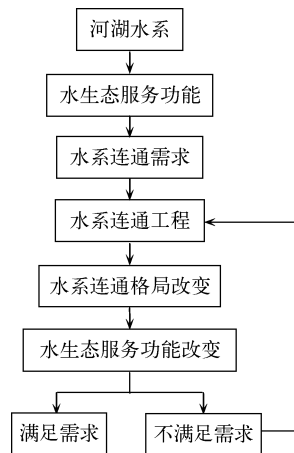


图1 水系连通需求、水系连通工程和水生态服务功能相互关系

Fig. 1 Relationship between water interconnection demand, project and water services

水系连通水平的发展程度受自然、社会、经济和技术水平的约束,也受水系连通需求的调节。随着社会经济的发展,水系连通工程的技术水平得到了前所未有的提高,人类对自然水系的改造和调控能力随之大

幅度提升. 在技术、资金条件允许的情况下, 水系连通水平提高到什么程度取决于水系连通需求的大小, 水系连通需求的大小又取决于人类及自然对水生态系统服务功能需求的大小, 例如对水资源的时空调配需求与能力.

目前水生态服务功能的评价方法相对比较成熟. 鉴于水系连通需求与水生态系统服务功能的密切关系, 采用水生态服务功能的评价方法对水系连通需求进行评价. 水生态系统服务功能评价方法主要有物质量表、价值量表和当量表^[9-10]. 物质量表和价值量表从生态系统所能提供给人类的生态服务价值进行度量, 物质量表评价方法能够反映出生态系统所提供的不同服务功能, 但各种服务功能之间难以统一成一个综合指标, 而价值量表评价方法侧重反映生态系统服务的总体稀缺性, 进而反映人类对生态系统服务的支付意愿, 其结果存在主观性. 水当量法是将人类对水生态系统的各类服务功能的占用折算成一个具有生态学意义的水量指标, 指在现有技术水平下, 特定人口规模生存和发展所需要的水资源供应、水环境净化、水环境维持、水安全调蓄以及水文化景观等功能的水的体积. 其特点是把各种功能统一到水的体积上来, 具有统一的量纲, 使其可定量评价, 并具有可比性. 综合考虑物质、价值量和水当量法等评价方法的特点, 本文采用当量表评价水系连通需求的大小.

基于水当量法的水系连通需求的计算公式为:

$$E_{L_t} = \sum_{i=0}^n (E_{i_t} - E_{i_0}) \quad (1)$$

式中, E_{L_t} 为 t 时刻的水系连通需求 (m^3), E_{i_t} 为 t 时刻 i 类水生态系统服务功能需求 (m^3), E_{i_0} 为水系现状连通条件下提供的 i 类生态服务功能 (m^3). E_{i_0} 表示当 $t=0$ 时, 即现状水平年的需求, 否则, 表示未来某一 t 时刻的需求.

2 太湖水系连通需求评价

太湖流域北依长江, 太湖居中, 江河湖相连, 水系沟通, 依存关系密切. 随着城镇化、工业化进程加快, 太湖流域水生态环境问题日益突出. 目前, 太湖流域十一项综合治理骨干工程已全面建成, 初步形成北向长江引排、东出黄浦江供排、南排杭州湾并且利用太湖调蓄的防洪与水资源调控工程体系, 同时也为提高流域和区域水资源承载能力、通过水利工程调控改善流域水生态环境创造了工程条件. 太湖是大型浅水湖泊, 环太湖出入河流有 228 条, 其中太湖北部直湖港以东至南部吴淞港以东河道以出湖为主, 主要有望虞河、太浦河和胥江等; 直湖港以西至吴淞港以西以入湖为主, 主要入湖河道有长兜港、长兴港、太滬运河、漕桥河、烧香港、太浦港等. 太湖位于流域中心, 是重要的淡水资源, 是周边大中城市重要的供水水源地. 此外, 太湖还具有防洪排涝、改善水环境、修复水生态以及旅游等功能. 根据太湖所承担的主要社会经济和生态功能, 太湖水系连通需求主要从水资源调配、洪水调蓄、改善水环境、提供水生生物栖息地等方面进行评价.

2.1 水资源调配需求

根据流域相关规划, 在强化节约、有效保护的基础上合理开源, 进一步扩大引江能力, 充分利用太湖调蓄能力, 提高太湖向下游及周边地区供水能力, 形成以太湖、望虞河、太浦河及新孟河为重点, 流域、区域和城市 3 个层次相协调的配置格局, 增强江河湖水系连通. 现状工况下, 基准年出湖和入湖水量多年平均值分别为 8.2×10^9 和 $8.7 \times 10^9 \text{ m}^3$; 2030 年, 出湖和入湖水量均进一步增加, 多年平均值分别为 $1.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $1.17 \times 10^8 \text{ m}^3$. 因此, 为满足太湖及其下游地区的供水需求, 多年平均出入湖水量分别需增加 $22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 另有约 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生产、生活取用水. 增加的水资源调配需求通过规划骨干河湖水系连通工程, 增加环太湖河道的出入湖水量, 促进水体流动, 增强太湖的供水服务能力.

2.2 调蓄水需求

太湖是流域防洪的重要调蓄湖泊, 太湖洪水的安全蓄泄是流域防洪安全的关键. 经过多年水利基本建设, 太湖流域已初步形成以治太骨干工程为主体的流域防洪工程体系, 防洪除涝能力得到较大提高. 但随着流域经济社会持续快速发展, 太湖面临着更高的防洪排涝安全连通需求, 根据太湖流域防洪规划, 以水体调蓄或输水能力的变化值表示对太湖调蓄洪水的需求. 91 年型洪水降雨相对集中在上游地区, 下游雨量相对较小, 现状工况太湖洪水调蓄水量占总水量的 60%; 规划方案太湖洪水调蓄水量占总水量的 45%. 99 年型

洪水降雨集中在下游,洪水下泄难度较大,现状工况太湖洪水蓄量占总水量的 87%,太湖调蓄任务繁重;规划方案太湖洪水调蓄水量占总水量的 72%。在不同雨型、规划条件下,太湖调蓄洪水量比现状工况条件下减少了 $7.2 \times 10^8 \sim 10.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,减幅达 15% ~ 27%。可以看出,与现状工况相比,规划方案减小了太湖调蓄洪水的压力,而下泄能力需要有较大幅度的提高,才能减轻太湖调蓄洪水压力。下泄能力增加主要通过水系连通工程增加洪水的外排能力,减少造峰期太湖的蓄洪水量来实现,即太湖调蓄洪水量的减少需要通过水系连通工程来增加洪水的输出。

2.3 水环境净化需求

以太湖水功能区确定的水质目标为标准,计算将水体净化到目标水质所需的水量作为水环境净化需水量。总磷和总氮是防治湖泊富营养化的主要控制指标,其中总磷虽然是关键性控制指标,但由于河流与湖泊的总磷执行标准的不统一,计算时选择将水体总氮指标稀释至目标水质所需的水量。水环境净化需水量包括两个部分:一是废污水净化需水量,即把进入水体的废污水净化到目标水质标准所需消耗的水量。二是湖泊水体的净化需水。如果水体本身水质劣于目标水质,则净化需水量为将水体净化到目标水质所需的水量;如果水体水质好于或达到目标水质,则该项需水量为零。

2.3.1 入湖水体净化需水量 根据文献中太湖总氮的出入湖通量数据(表 1),得到 2000 年以来总氮在太湖的年滞留量为 $1.27 \times 10^4 \sim 3.31 \times 10^4 \text{ t}$,平均为 $2.28 \times 10^4 \text{ t}$ 。以长江水质最好时的标准,即 I 类水质标准计算,长江总氮为 0.2 mg/L ,将太湖滞留的总氮净化至湖库 III 类水标准,计算可得净化需水量为 $1.59 \times 10^{10} \sim 4.14 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$,平均 $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ (表 1)。

表 1 总氮出入太湖通量历史变化及净化需水量

Tab. 1 Historical changes in TN pollutant fluxes of Lake Taihu and purification water demand

| | 翟淑华等 ^[11] | | | 许朋柱等 ^[12] | 燕姝雯等 ^[13] | 平均值 |
|---|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|-------|
| | 2000 年 | 2001 年 | 2002 年 | 2001—2002 年 | 2009 年 | |
| 入湖通量/($\times 10^4 \text{ t/a}$) | 3.43 | 3.47 | 4.46 | 2.87 | 5.11 | 3.87 |
| 出湖通量/($\times 10^4 \text{ t/a}$) | -0.73 | -0.87 | -1.15 | -1.60 | -3.60 | -1.59 |
| 滞留量/($\times 10^4 \text{ t/a}$) | 2.70 | 2.60 | 3.31 | 1.27 | 1.51 | 2.28 |
| 需水量/($\times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$) | 3.38 | 3.25 | 4.14 | 1.59 | 1.89 | 2.85 |

2.3.2 太湖水体净化需求 根据“2008 年太湖健康状况报告”^①,2005、2006、2007 和 2008 年太湖总氮年均值分别为 2.49、2.85、2.35 和 2.42 mg/L。连续 4 年的平均值为 2.47 mg/L,与 III 类水质标准相比,超标 1.47 倍。太湖多年平均蓄水量按 $4.43 \times 10^9 \text{ m}^3$ 计,若长江总氮按 0.2 mg/L (I 类水质标准)计,则将太湖水体净化至 III 类水,需要引调水 $8.14 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

2.4 水生境维持需求

维持湖泊水生生物栖息地的需水量采用最低生态水位对应的水量表示。在资料缺乏的条件下,确定最低生态水位的方法有天然水位资料统计法、湖泊形态分析法和生物空间最小需求法^[14]。天然水位资料统计法是根据水位资料,取不同频率水文年日均、旬均或月均最低水位。湖泊形态分析法根据实测湖泊水位(H)和湖泊面积(F)资料,建立湖泊水位和 dF/dH 的关系线。在此关系线上, dF/dH 最大值相应水位为最低生态水位。生物空间最小需求法用湖泊各类生物对生存空间的需求来确定最低生态水位。采用生物空间最小需求法计算生境需水的需求时一般考虑鱼类需水,即根据鱼类需求的最小水深加上湖底高程求得最低生态水位。根据《太湖鱼类志》^[15],太湖鱼类对水深的最低要求一般为 1.5 ~ 2.0 m。为维持太湖鱼类生境,取其中间值作为最小水深,即为 1.75 m,再根据太湖湖底平均高程(约 1.0 m)得到维持生境最低水位为 2.75 m。另据太湖系列水位、水资源量分析表明,太湖旬平均水位不低于 2.65 m 时(该水位接近太湖实测水位(1964—2000 年)平水年最低旬平均水位),可满足城镇供水、农田灌溉、航运、渔业等方面的要求,而 2.75 m 的水位亦与

① 水利部太湖流域管理局,江苏省水利厅,浙江省水利厅,上海市水务局. 2008 年太湖健康状况报告.

此要求相符. 根据太湖水位-库容数据^[16], 建立水位-库容关系式, 计算得到 2.75 m 时的湖泊蓄水量为 $3.58 \times 10^9 \text{ m}^3$.

3 结果与讨论

太湖连通需求评价结果表明: 至 2030 年, 太湖的水资源调配需求为 $3.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (随水平的变化而变化); 太湖调蓄洪水需求减少 $7.2 \times 10^8 \sim 10.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 入湖水环境净化需求为 $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$; 湖水净化需水 $8.14 \times 10^9 \text{ m}^3$; 维持鱼类生存需水 $3.58 \times 10^9 \text{ m}^3$ (表 2). 在各类连通需求中, 净化入湖废污水所需水量最大, 其次是湖水净化需水, 再次是维持生境需水, 最后为水资源调配需水. 而为了减轻太湖防洪压力, 太湖调蓄洪水的需求减少. 从该评价结果可以看出, 未来需要建立水系连通工程增加出入湖水量, 增加水体流动, 提高太湖对周边城市供水安全稳定的保障能力, 同时增加湖泊环境容量, 改善湖泊水环境, 并保障湖泊生境最低需水量, 并在完善通江渠道、恢复江湖关系、理顺河湖水系的基础上, 增加太湖的外排能力.

表 2 太湖水系连通各生态服务功能需水水量计算结果汇总

Tab. 2 Total water demand of Lake Taihu interconnection with surrounding water system

| 需求类型 | 水资源调配 | 调蓄洪水 | 水环境净化 | | 维持生境 |
|------|--|--|--|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | 入湖废污水净化 | 湖水净化 | |
| 水量 | $3.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ | $(-10.7 \sim -7.2) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ | $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ | $8.14 \times 10^9 \text{ m}^3$ | $3.58 \times 10^9 \text{ m}^3$ |
| 需水时间 | 每年 | 每年 | 每年 | 一次性 | 非消耗水量 |

与太湖水系连通的实践水平及发展潜力相比较, 在所评价的连通需求中, 水资源调配、调蓄洪水和维持生境的需求与太湖当前及未来一段时期内可实现的水系连通能力相符合, 而水环境净化需求与太湖水系的现状连通水平相差很大, 在未来一段时间内亦难以全部实现. 因为太湖多年平均入湖水量为 $80.94 \times 10^8 \text{ m}^3$, 出湖水量为 $88.97 \times 10^8 \text{ m}^3$. 即使考虑“引江济太”以来, 平均每年增加 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的入湖水量, 总入湖水量可达到 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而 $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ 的水环境净化需水仍远远超出了太湖水系连通的最大能力. 即使能够实现该引水需求, 还会产生增加湖泊外排压力等其它水问题. 造成这种现象的原因在于, 水当量法评价结果是基于现状与规划目标相比较而得出的, 表达了水系连通需求所需要的总水量, 需要根据不同需求制定不同的连通策略. 就水环境净化而言, 改善水环境、维护水生态的根本途径在于减少污染物入湖、清淤疏浚、利用水生生物进行生态修复等方面. 不同的需求以及同一种需求可以有多种连通途径, 如何利用水环境净化需求评价结果来确定各种连通途径的比例需要进一步研究.

由于水生态服务功能之间具有相容性, 水文化、水景观游憩功能所占用的水量与水资源供给、水环境净化、水生境维持、水安全调蓄这 4 方面所占用水量相容^[17], 国家重点风景游览区及与人体非直接接触的景观娱乐水体执行地表水 IV 类 (GB/T 3838-2002) 标准, 太湖水功能区标准为 III 类, 满足景观娱乐水质要求, 故景观娱乐及文化功能的需求水量不再重复计算.

限于资料等原因, 计算时未考虑因引水而改善了水动力条件后增加的水体自净能力, 可能使结果偏高, 但总体上湖泊水域流动性差, 水体更新周期长, 自净能力较弱, 基本可忽略不计.

4 结论

水系连通需求随着经济社会的发展和人们对人水关系认识的发展而变化, 它最终通过各种水系连通工程来实现, 是水系连通实践的内在驱动力. 水系连通需求的基础在于水系本身所固有的能提供各种水生态系统服务功能的基本特征. 运用水生态系统服务功能的水当量方法可以定量评价水系连通需求的大小, 该方法评价结果显示的是水系连通的总需求. 对太湖水系连通需求评价表明, 水资源调配、调蓄洪水和维持生境与太湖水系连通工程的能力和水平相适应, 而水环境净化需求远远超出太湖水系连通的能力. 需要进一步研究改善太湖水环境的各种措施, 并确定通过水系连通工程 (引调水) 改善水环境在满足水环境净化需求中的适当比例.

水系连通需求的定量评价可为水系连通工程的类型、功能、设计规模和调度管理提供技术依据。由于水利工程的运行效果受自然水文条件和管理水平的影响,连通后的水生态系统服务功能往往不能完全达到预期需求,出现了水系连通需求不能得到完全满足的情况,需要进一步论证并调整连通需求,确定连通工程规模。水系连通需求的实现受连通能力的制约,而连通能力的大小又受自然、经济、科技水平等因素的影响,需要综合考虑后才能确定。

5 参考文献

- [1] 李宗礼,李原园,王中根等. 河湖水系连通研究:概念框架. 自然资源学报,2011,26(3):513-522.
- [2] 王中根,李宗礼,王昌明等. 河湖水系连通的理论探讨. 自然资源学报,2011,26(3):523-529.
- [3] 李原园,郦建强,李宗礼等. 河湖水系连通研究的若干问题与挑战. 资源科学,2011,33(3):386-391.
- [4] 夏 军,高 扬,左其亭等. 河湖水系连通特征及其利弊. 地理科学进展,2012,31(1):26-31.
- [5] 肖建红,施国庆,毛春梅等. 三峡工程对河流生态系统服务功能影响预评价. 自然资源学报,2006,21(3):424-431.
- [6] 李宗礼,刘晓洁,王中根等. 南方河网地区河湖水系连通的实践与思考. 资源科学,2011,33(12):2221-2225.
- [7] 欧阳志云,赵同谦,王效科等. 水生态系统服务功能分析及其间接价值评价. 生态学报,2004,24(10):2091-2099.
- [8] 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. 水科学进展,2011,22(1):126-134.
- [9] Ye YP, Wang RS, Ren JM *et al.* Ecological service assessment of human-dominated freshwater ecosystem with a case study in Yangzhou Prefecture, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16: 755-761.
- [10] 赵景柱,肖 寒,吴 刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析. 应用生态学报,2000,11(2):290-292.
- [11] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年). 湖泊科学,2006,18(3):225-230.
- [12] 许朋柱,秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量. 湖泊科学,2005,17(3):213-218.
- [13] 燕姝雯,余 辉,张璐璐等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量. 湖泊科学,2011,23(3):855-862.
- [14] 徐志侠,陈敏建,董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. 生态学报,2004,24(10):2324-2328.
- [15] 倪 勇,朱成德. 太湖鱼类志. 上海:上海科学技术出版社,2005.
- [16] 胡 毅. 太湖整治后的湖区水位变化. 上海水利,1994,(1):13-19.
- [17] 李 芬,孙然好,杨丽蓉等. 基于供需平衡的北京地区水生态系统服务功能评价. 应用生态学报,2010,21(5):1146-1152.