

基于 ESEF 的水生态承载力评估

——以太湖流域湖州市为例

焦雯珺, 闵庆文*, 李文华, Anthony M. Fuller

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

【摘要】以基于生态系统服务的生态足迹(ESEF)为基础的水生态承载力评估方法,综合考虑了水量支撑、水质限定和水生态稳定三方面特征,从而实现了足迹方法对水生态系统承载能力的有效表征。然而,如何界定水产品、水资源和水污染足迹以及承载力之间的关系,是目前研究的重点和难点。以太湖流域上游湖州市为例,探讨了在考虑或不考虑水质标准与环境功能分类的情况下,如何利用求并集法或求平均值法进行基于ESEF的水生态承载力评估。研究表明,两种方法均反映出湖州市人们对水生态系统服务的消费需求超出了当地水生态系统的供给能力,需求与供给之间的差距对当地水生态系统的可持续性造成影响。综合考虑水产品供给、水量支撑和水质保障三方面因素,湖州市水生态系统可承载的人口与经济规模为现状水平的95%;如果增加对水质标准和环境功能分类的考虑,则湖州市水生态系统的承载能力仅为现状水平的79%。虽然求并集法的计算结果更有说服力,但是求平均值法则提供了在更小尺度上研究的可能。

【关键词】水生态承载力; 水生态足迹; 基于生态系统服务的生态足迹(ESEF); 水质标准与环境功能; 求平均法; 求并集法; 太湖流域

【中图分类号】P468

【文献标识码】A

【文章编号】1004-8227 (2016) 01-0147-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201601018

以流域综合管理为核心的水环境管理理念要求人们从更高的角度认识水生态系统相对于人类的承载能力^[1]。水生态承载力的概念就是在这样的背景下提出的。它以生态承载力^[2,3]、水资源承载力^[4,5]和水环境承载力^[6,7]为基础,是对承载力研究的进一步扩展与完善。综合目前学者对其概念与内涵的探讨^[1,8-12],水生态承载力是一个具有复合性和动态性的承载力概念。复合性体现在

收稿日期: 2015-04-16 ; 修回日期: 2015-06-30

基金项目:中国科学院地理科学与资源研究所“一三五”战略科技计划项目(201220007)[the Key Project for the Strategic Science Plan in IGSNRR, CAS (2012ZD007)]; 中国博士后科学基金项目(2013M530710)[the China Postdoctoral Science Foundation (2013M530710)]; 中国科学院外国专家特聘研究员计划项目(2013T2Z0011)[the CAS Visiting Professor-Ship for Senior International Scientists (2013T220011)]

作者简介:焦雯珺(1983-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为资源生态安全与区域可持续发展E-mail: jiaowj@igsrr.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: minqw@igsrr.ac.cn

它涵盖了水资源承载力、水环境承载力和栖息地环境承载力，不仅以自然过程为对象而且包括社会经济系统。动态性一方面是因为其具有时空分异性，另一方面是因为社会经济系统与水生态系统之间的动态平衡。

水生态承载力评估将水资源和水环境问题统一考虑，将社会经济发展与水生态系统联系起来，是实现流域综合管理的重要基础和技术手段之一。目前水生态承载力的研究方法主要有统计学方法^[13,14]、系统动力学方法^[10,12]和生态足迹方法。由于足迹方法起初用于水资源承载力评估，大部分研究[15-20]还是侧重于水资源的承载状况，缺乏对水质、水量以及生物需求的综合考虑。少数研究^[21,22]尝试将足迹划分为水产品、水资源和水污染三个部分，但是由于简单套用传统生态足迹的研究框架，水资源和水污染足迹缺乏有效的理论基础，水产品、水资源和水污染足迹之间亦缺乏合理的逻辑关系，因而弱化了评估的科学合理性。

基于生态系统服务的生态足迹（Ecosystem-Service-based Ecological Footprint，ESEF）于2011年提出^[23]，其核心思想是将足迹构建于多种生态系统功能之上，并根据生态系统服务的类型拓展出基于资源供给和废弃物吸纳的两大类生态足迹^[24]。根据资源的类型，基于资源供给的生态足迹可以进一步拓展为基于生物生产、水资源供给等服务类型的生态足迹；根据废弃物的类型，基于废弃物吸纳的生态足迹可以进一步细化为基于碳固定、多余养分去除等服务类型的生态足迹等^[25]。

基于ESEF的水生态承载力评估方法以ESEF方法为基础，综合考虑了水量支撑、水质限定和水生态稳定三方面特征，能够定量评估人类活动对水生态系统造成的各种影响，进而实现足迹方法对水生态系统承载能力的有效表征^[26]。基于ESEF的水生态承载力研究目前的重点与难点在于，如何处理水产品、水资源和水污染足迹以及承载力之间的关系，从而使基于足迹方法的水生态承载力评估更加科学合理。本文就此展开论述，以太湖流域上游湖州市为例，着重探讨了在考虑水域水质与功能分类的前提下，如何进行基于ESEF的水生态承载力评估，旨在为基于ESEF的水生态承载力应用研究提供方法指导。

1 理论方法

人类对水生态系统服务的利用主要表现为消费水产品、消耗水资源以及排放水污染物。基于水生态系统服务的生态足迹，简称水生态足迹(WEF)，被定义为满足一定人口或一定经济规模消费的水产品、消耗的水资源以及吸纳其所产生的水污染物所需要的水生态系统面积^[26]，具体包括水产品足迹(APF)、水资源足迹(WSF)和水污染足迹(PAF)(表1)。基于水生态系统服务的生态承载力，简称水生态承载力(WEC)，被定义为给定区域内具有水产品生产、水资源供给和水污染物吸纳能力的水生态系统面积，由水产品承载力(APC)、水资源承载力(WSC)和水污染承载力(PAC)三部分构成(表1)。通过比较WEF和WEC，可以得到不同尺度人类对水生态系统服务的需求和水生态系统供给能力之间的差异，进而实现对一个地方、区域或国家水生态系统承载状况的评价。

表 1 主要概念一览表
Tab.1 List of the Main Concepts

概念	缩写	内涵
水生态足迹	WEF	满足一定人口或一定经济规模消费的水产品、消耗的水资源以及吸纳其所产生的水污染物所需要的水生态系统面积，包括水产品足迹、水资源足迹和水污染足迹
水生态承载力	WEC	给定区域内具有水产品生产、水资源供给和水污染物吸纳能力的水生态系统面积，由水产品承载力、水资源承载力和水污染承载力构成
水产品足迹	APF	以河流、湖泊、水库、池塘等水生态系统生产鱼、虾、蟹等水产品的能力为基础，衡量的是满足人类消费的水产品所需要的水生态系统面积
水产品承载力	APC	给定区域内具有水产品生产能力的水生态系统面积
水资源足迹	WSF	以水生态系统的水资源供给能力为基础，衡量的是满足人类在生产生活中消耗的水资源所需要的水生态系统面积
水资源承载力	WSC	给定区域内具有水资源供给能力的水生态系统面积
水污染足迹	PAF	以水生态系统对有机物和氮、磷营养盐等的分解和去除能力为基础，衡量的是吸纳人类在生产生活中排放的水污染物所需要的水生态系统面积
水污染承载力	PAC	给定区域内具有水污染物吸纳能力的水生态系统面积

1. 1 水生态足迹模型

国家尺度的水生态足迹（WEF）模型可以表示为：

$$\dot{WEF} = f(APF, WSF, PAF) \quad (1)$$

式中：APF 为水产品足迹；WSF 为水资源足迹；PAF 为水污染足迹； $f(x)$ 是 APF、WSF 和 PAF 内部逻辑关系的数学表达式。

1. 1. 1 水产品足迹模型

国家尺度的水产品足迹（APF）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$APF = \frac{R_a}{GS_a} = \frac{R_a}{NS_a} \bullet SF_a \quad (2)$$

式中： R_a 为水产品的消费量； GS_a 为水产品的世界平均生产能力； NS_a 为水产品的国家平均生产能力； SF_a 为水产品生产服务的供给因子，表征水产品的国家平均生产能力与世界平均生产能力的差异。

1. 1. 2 水资源足迹模型

国家尺度的水资源足迹（WSF）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$WSF = \frac{R_w}{GS_w} = \frac{R_w}{NS_w} \bullet SF_w \quad (3)$$

式中： R_w 为水资源的消耗量； GS_w 为水资源的世界平均供给能力； NS_w 为水资源的国家平均供给能力； SF_w 为水产品生产服务的供给因子，表征水产品的国家平均生产能力与世界平均生产能力的差异。考虑到生境和生物多样性保护对水量的需求，在计算水资源供给能力时扣除 60% 的生态环境用水^[27, 28]。

1. 1. 3 水污染足迹模型

国家尺度的水污染足迹（PAF）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$PAF = \frac{W_p}{GS_p} = \frac{W_p}{NS_p} \bullet SF_p \quad (4)$$

式中： W_p 为污染的排放量； GS_p 为水污染物的世界平均吸纳能力； NS_p 为水污染物的国家平均吸纳能力； SF_p 为水污染吸纳服务的供给因子，标准水污染物的国家平均吸纳能力与世界平均吸纳能力的差异。

1. 2 水生态承载力模型

国家灰度的水生态承载力（WEC）模型可以表示为：

$$WEC = f'(APC, WSC, PAC) \quad (5)$$

式中： APC 为水产品承载力； WSC 为水资源承载力； PAC 为水污染承载力； $f'(x)$ 是 APC 、 WSC 和 PAC 内部逻辑关系的数学表达式。

1. 2. 1 水产品承载力模型

国家尺度的水产品承载力（APC）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$APC = A_a \bullet SF_a \quad (6)$$

式中： A_a 为具有水产品生产能力的水域面积； SF_a 为水产品生产服务的供给因子。

1. 2. 2 水资源承载力模型

国家尺度的水资源承载力（WSC）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$WSC = A_w \bullet SF_w \quad (7)$$

式中： A_w 为具有水资源供给能力的水域面积； SF_w 为水资源供给服务的供给因子。

1. 2. 3 水污染承载力模型

国家尺度的水污染承载力（PAC）模型，以全球公顷为单位，可以表示为：

$$PAC = A_p \bullet SF_p \quad (8)$$

式中： A_p 为具有水污染物吸纳能力的水域面积； SF_p 为水污染吸纳服务的供给因子。

2 案例研究

2. 1 研究区概况

湖州市抵触浙江省北部、太湖流域上游，辖德清、长兴、安吉三县和南浔、吴兴两区，总面积 5817 km^2 2008 年，湖州市常住人口达到 281.5×10^4 人，人口密度 $484 \text{ 人}/\text{km}^2$ ；地区生产总值（GDP）为 1034.89×10^8 元，人均生产总值为 40 089 元。湖州市水系发达，属长江下游太湖流域水系，境内有杭嘉湖水系、苕溪水系和长兴水系三大水系，主要河流有西苕溪、东苕溪（中下游）、下游塘、双林塘、泗安塘等。2008 年，湖州市水资源总量为 $46.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中地表水资源量 $45.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，地下水资源量 $10.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；供水总量 $17.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中地表水供水量 $17.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占供水总量的 99.4 %。2008 年，湖州市地表水水质总体上有所好转，主要污染指标为氨氮、总磷、生化需氧量、溶解氧等，污染类型以有机型污染为主；监测断面中符合 Ⅰ 类、Ⅱ 类、Ⅲ 类和 Ⅳ 类水质标准的断面比例分别为 18.7 %、50.7 %、1.3 % 和 8.0 %，劣 Ⅳ 类水质的断面占 9.3 %。

2. 2 模型构建

研究主要在地方尺度展开，仅考虑湖州市本身的自然条件与人类活动特征，没有与流域或全国其它城市进行比较。因此，本文在计算中选择以“实际公顷”为表征单位，并对足迹与承载力模型进行了相应简化。通过分析湖州市水产品消费、水资源消耗和水污染物排放，揭示人类利用水生态系统服务活动对当地水域空间的生态占用。通过对比人类社会需求与自然供给能力，实现湖州市水生态承载力的综合评估。

湖州市水产品足迹（APF）和水产品承载力（APC）模型可以表示为：

$$APF = \frac{R_a}{LS_a} \quad (9)$$

式中： R_a 为湖州市水产品的消费量（kg）； LS_a 为湖州市水产品平均生产能力（ kg/hm^2 ）。

$$APC = A_a \quad (10)$$

式中： A_a 为湖州市具有水产品生产能力的水域面积（ hm^2 ）。

湖州市水资源足迹（WSF）和水资源承载力（WSC）模型可以表示为：

$$WSF = \frac{R_w}{LS_w} \quad (11)$$

式中： R_w 为湖州市水资源的消费量（ m^3 ）； LS_w 为湖州市水资源平均供给能力（ m^3/hm^2 ）。

$$WSC = A_w \quad (12)$$

式中： A_w 为湖州市具有水资源供给能力的水域面积（ hm^2 ）。

湖州市水污染属有机物和营养盐污染类型。已有研究表明，湖州市磷污染足迹最大，氮污染足迹次之，有机物污染最小；氮磷营养盐对当地水环境的影响已经超过了游踪污染物^[29,30]。因此，本文选择磷污染物为研究对象，在此基础上构建湖州市水污染足迹（PAF）和水污染承载力（PAC）模型。

$$PAF = \frac{W_p}{LS_p} \quad (13)$$

式中： W_p 为湖州市排水水体中磷的量（ kg ）； LS_{cod} 为湖州市水体对磷的评价吸纳能力（ kg/hm^2 ）。

$$PAC = A_p \quad (14)$$

式中： A_p 为湖州市具有水污染物吸纳能力的水域面积（ hm^2 ）。

2. 3 评估方法

2. 3. 1 求平均法

根据土地利用遥感解译数据，2008 年湖州市水域总面积为 20896.0 hm^2 。在不考虑水域水质与功能分类的前提下，本文将湖州市的全部水域面积用于 APC、WSC 和 PAC 的计算，并取 3 者的平均值作为湖州市的水生态承载力。

湖州市水生态承载力（WEC）模型可以表示为：

$$WEC = \text{Avg}(APC, WSC, PAC) \quad (15)$$

式中 APC、WSC 和 PAC 分别为湖州市水产品、水资源和水污染承载力（ hm^2 ）。

根据《太湖流域水环境综合治理总体方案》、2009 年湖州市统计年鉴、2008 年湖州市水资源公报、湖州市第一次污染源普查等资料，计算得到 R_a 、 R_w 、 W_p 分别为 $42.75 \times 10^6 \text{ kg}$ 、 $17.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $420.7 \times 10^3 \text{ kg}$ （表 2）。在不考虑水域水质与功能分类的前提下，本文将湖州市的全部水域面积用于湖州市水产品平均生产能力、水资源平均供给能力和水体对磷的平均吸纳能力的计算，得到 LS_a 、 LS_w 、 LS_p 分别 $10.89 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$ 、 $8.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 10.00 kg/hm^2 （表 2）。

表 2 求平均法的参数计算结果

Tab.2 Calculation Results of the Parameters in the Averaging Method

	水域面积	供给能力	单位面积供给能力	消费能力
水产品生产	20 896.0	$227.56 \times 10^6 \text{ kg}$	$10.89 \times 10^3 \text{ kg}$	$42.75 \times 10^6 \text{ kg}$
水资源供给	20 896.0	$18.74 \times 10^8 \text{ m}^3$	$8.97 \times 10^4 \text{ m}^3$	$17.67 \times 10^8 \text{ m}^3$
水污染物吸纳	20 896.0	$209.00 \times 10^3 \text{ kg}$	10.00 kg	$420.7 \times 10^3 \text{ kg}$

相应的，本文取 APF、WSF 和 PAF 的平均值作为湖州市的水生态足迹。湖州市水生态足迹（WEF）模型可以表示为：

$$WEF = \text{Avg}(APF, WSF, PAF) \quad (16)$$

式中 APF、WSF 和 PAF 分别为湖州市的水产品、水资源和水污染足迹（ hm^2 ）。

2. 3. 2 求并集法

虽然水域能够提供多种生态系统服务，但是就某一处水域而言，它或许只能提供某一种生态系统服务。根据《地表水环境质量标准 GB3838 - 2002》^①，属于 IV 类的一般工业用水区和非直接接触的娱乐用水区一般不会用来提供生活饮用水和进行水产养殖，而生活饮用水地表水源地保护区、水产养殖区等渔业水域也往往不会用于提供工业用水。

①<http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/index.htm>

增加对水质标准与水域功能分类的考虑后, 本文认为 I 类、II 类和 III 类水域主要用于水产品生产, I 类至 V 类具有水资源供给能力 (其中 I 类至 III 类水域用于生活饮用水供给, IV 类和 V 类水域分别提供工业用水和农业用水), IV 类、V 类以及劣 V 类水域则是主要的污染物受纳水体。因此, 水产品、水资源与水污染承载力的关系如图 1 所示。A 部分代表水产品承载力; A + B 部分代表水资源承载力; B + C 部分代表水污染承载力; 水生态承载力则为水产品、水资源和水污染承载力的并集, 即 A + B + C 部分。

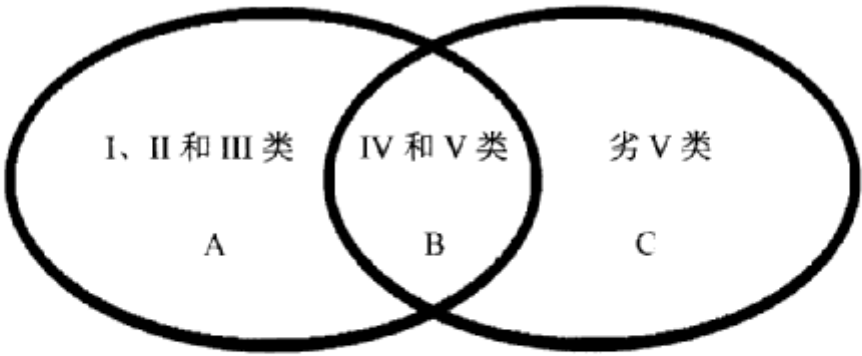


图 1 水产品、水资源与水污染承载力之间的关系

Fig.1 Relationship Among Aqua-product Provision, Water Supply and Pollutant Absorption Capacities

2008 年湖州市 II 类、III 类、IV 类和 V 类水质标准的断面比例分别为 18.7 %、50.7 %、13.3 %和 8.0 % , 劣 V 类水质的断面占 9.3 %。据此, 计算得到湖州市具有水产品生产能力的水域面积为 $14\,501.8\,hm^2$, 具有水资源供给能力的水域面积为 $18\,952.7\,hm^2$, 具有水污染物吸纳能力的水域面积为 $6\,394.2\,hm^2$ (表 3)。利用该结果, 计算得到湖州市 LS_a 、 LS_w 、 LS_p 分别为 $15.69 \times 10^3\,kg/m^2$ 、 $9.89 \times 10^4\,m^3/hm^2$ 、 $32.96\,kg/hm^2$ 。

表 3 基于不同方法的数据处理结果对比
Tab.3 Comparison of Results Between Different Data Processing Methods

	求平均法		求并集法	
	水域面积(hm^2)	单位面积供给能力	水域面积(hm^2)	单位面积供给能力
水产品生产	20 896.0	$10.89 \times 10^3\,kg$	14 501.8	$15.69 \times 10^3\,kg$
水资源供给	20 896.0	$8.97 \times 10^4\,m^3$	18 952.7	$9.89 \times 10^4\,m^3$
水污染物吸纳	20 896.0	10.00 kg	6 394.2	32.69 kg

湖州市水生态承载力 (WEC) 模型可以表示为:

$$WEC = Union(APC, WSC, PAC) \quad (17)$$

式中 APC、 WSC 和 PAC 分别为湖州市的水产品、水资源和水污染承载力（ hm^2 ）。

相应的，水生态足迹也通过求解水产品、水资源和水污染足迹的并集得到。湖州市水生态足迹（WEF）模型可以表示为：

$$WEF = Union(APF, WSF, PAF) \quad (18)$$

式中 APF、WSF 和 PAF 分别为湖州市的水产品、水资源和水污染足迹（ hm^2 ）。

在这里本文提出一个初步的水生态足迹并集求解方法，但是其合理性与可推广性还有待讨论。根据不同水质类别所占的比例，将水产品足迹定为 A_1 ，将水资源足迹分为 A_2 和 B_1 ，将水污染足迹分为 B_2 和 C ，取 A_1 和 A_2 的最大值，取 B_1 和 B_2 的最大值， $A_{\max} + B_{\max} + C$ 即为水生态足迹。

2. 3. 3 承载力指数

本文将水生态承载力与水生态足迹的比值定义为水生态系统承载力指数（Carrying Capacity Index ,CCI），表征一定发展水平下水生态系统对人口和经济规模的承载能力。湖州市的 CCI 可以表示为：

$$CCI = \frac{WEC}{WEF} \quad (19)$$

式中 WEC 和 WEF 分别为湖州市的水生态承载力和水生态足迹（ hm^2 ）。

2. 4 结果分析

2008 年湖州市常住人口达到 281.5 万人，实现地区生产总值（GDP）1034.89 亿元。然而，综合考虑水产品供给、水量支撑和水质保障三方面因素，湖州市水生态系统可承载的人口为 245.6 万人、可承载的经济规模为 983.15 亿元；如果增加对当地水域水质和环境功能分类的考虑，湖州市水生态系统可承载的人口仅为 204.2 万人、可承载的经济规模仅为 817.56 亿元（表 4）。

表 4 基于不同方法的湖州市水生态承载状况对比

Tab.4 Comparison of the Water Ecological Carrying Capacity of Huzhou Between Averaging and Union Methods

	承载力指数(CCI)	现状人口(10^4 persons)	现状经济规模(10^8 yuan)	承载人口(10^4 persons)	承载经济规模(10^8 yuan)
求平均法	0.95	258.5	1 034.89	245.6	983.15
求并集法	0.79	258.5	1 034.89	204.2	817.56

不论是求平均法还是求并集法，基于 ESEF 的水生态承载力研究均表明，湖州市人们对水生态系统服务的消费需求超出了当地水生态系统的供给能力，这必然会对当地水生态系统的可持续性造成很大压力。然而，当考虑到水域的水质和环境功能分类时，湖州市水生态系统对社会经济系统的承载能力更低。这是因为，当增加对水域水质和环境功能分类的考虑时，湖州市水生态足迹高达 $26\,540.1\,hm^2$ ，相反仅为 $21\,598.3\,hm^2$ 。然而，不论是否考虑水域水质和环境功能分类，湖州市的水生态承载力都为 $20\,896.0\,hm^2$ ，这使得求并集法得到的湖州市水生态承载能力指数（0.79）低于求平均法（0.95）（表 5）。

表 5 基于不同方法的湖州市水生态足迹与承载力结果对比
Tab.5 Comparison of Water Ecological Footprints and Capacities of Huzhou Between Averaging and Union Methods

	求平均法		求并集法	
	承载力(hm^2)	足迹(hm^2)	承载力(hm^2)	足迹(hm^2)
水产品	20 896.0	3 925.9	14 501.8	2 724.9
水资源	20 896.0	19 699.0	18 952.7	17 866.5
水污染	20 896.0	42 070.0	6 394.2	12 869.4
水生态	20 896.0	21 898.3	20 896.0	26 540.1

虽然当水域水质和环境功能分类时，湖州市的水生态足迹升高了，但是湖州市的水产品、水资源和水污染足迹计算结果均有下降，其中水污染足迹更是降低了近 70 %。由于求并集法得到的湖州市水产品、水资源和水污染承载力结果也较求平均法低，两种方法计算结果所揭示出的水产品、水资源和水污染承载规律是相同的。

从表 5 中可以看出，湖州市水产品承载力约为当地水产品足迹的 5 倍，说明人们消费的水产品量仅占用了当地水生态系统生产能力的 $1/5$ ，人们对水产品的消费完全在当地水生态系统的水产品供给能力之内。相比之下，湖州市水资源足迹则占用了当地 94 %的水资源承载力。虽然当地水生态系统能够基本上满足人们的水资源消费需求，但是仅为 6 %的盈余比例意味着湖州市水生态系统对社会经济系统的水量支撑能力不容乐观。湖州市水污染足迹则达到了当地水污染承载力的两倍，显然人们排放到水体中的污染物量超出了当地水域的纳污能力。高强度的污染物排放活动必然会对当地水生态系统的水质保障能力产生显著影响，并进而影响到生物栖息地质量和水质目标管理。

3 结论与讨论

如何界定水产品、水资源和水污染足迹以及承载力之间的关系，是目前基于 ESEF 的水生态承载力研究的重点与难点。本文以太湖流域上游湖州市为例，探讨了在考虑或不考虑水域水质与环境功能分类的情况下，如何利用求并集法或求平均值法进行基于 ESEF 的水生态承载力评估，为基于 ESEF 的水生态承载力评估方法的实际应用提供了方法指导。

无论是使用求平均法还是求并集法，结果都表明湖州市人们对水生态系统服务的消费需求超出了当地水生态系统的供给能力，需求与供给之间的差距对当地水生态系统的可持续性造成影响。综合考虑水产品供给、水量支撑和水质保障三方面因素，湖州市水生态系统可承载的人口与经济规模为现状水平的 95 %，如果增加对水域水质和环境功能分类的考虑，则湖州市水生态系统的承载能力仅为现状水平的 79 %。

虽然两种方法对湖州市水生态系统承载能力的反映基本一致，但是求并集法增加了对湖州市水域水质与环境功能分类的考虑，对具有水生态系统服务供给能力的水域面积的界定更符合基于 ESEF 的水生态承载力的定义，而基于此的计算结果亦更有说服力。与求并集法相比，求平均法在处理水产品、水资源和水污染足迹以及承载力之间关系上则显得较为简单，但是这种概括的处理方式为使用者提供了一种可能，即在水域水质与环境功能分类数据很难获取的小尺度上进行研究，例如求平均法可以用

于计算潮州市各区县的水生态承载力，从而揭示当地水生态系统承载能力的空间差异。此外，二者在揭示水产品、水资源和水污染承载规律上的一致性，也为求平均方法的使用提供了更多空间。

总的来说，进行基于 ESEF 的水生态承载力评估时，求平均法和求并集法各有利弊，这在一定程度上取决于数据资料的可得性。由于两种方法均处于探索阶段，它们的合理性和可推广性还有待于进一步讨论。不同研究区的实际情况亦不同，即使是同样的研究方法，研究结果也会受到一定程度的影响，因此还需要更多的案例研究作为支撑。

参考文献：

- [1] 王西琴，高伟，何芬，等．水生态承载力概念与内涵探讨[J]．中国水利水电科学研究院学报，2011，9（1）：41-46.
- [2] 高吉喜．可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]．北京：中国环境科学出版社，2001．
- [3] 杨志峰，隋欣．基于生态系统健康的生态承载力评价[J]．环境科学学报，2005，25（5）：586-594.
- [4] 孙才志，左海军，杨静．基于极大熵原理的黄河流域水资源承载力研究——以山西段为例[J]．资源科学，2004，26（2）：17-22.
- [5] 赵建世，王忠静，秦韬，等．海河流域水资源承载能力演变分析[J]．水利学报，2008，39（6）：647-651.
- [6] 潘军峰．流域水环境承载力理论及应用——以永定河上游为例[D]．西安：西安理工大学博士学位论文，2005．
- [7] 赵卫，刘景双，苏伟，等．辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究[J]．中国环境科学，2008，28（1）：73-77.
- [8] 谭红武，杜强，彭文启，等．流域水生态承载力及其概念模型[J]．中国水利水电科学研究院学报，2011，9（1）：1-8.
- [9] 刘武艺，邵东国，唐明．基于城市水生态系统健康的生态承载力理论探讨和评价研究[J]．安全与环境学报，2007，7（2）：105-108.
- [10] 李靖，周孝德．叶尔羌河流域水生态承载力研究[J]．西安理工大学学报，2009，25（3）：249-255．
- [11] 曾晨，刘艳芳，张万顺，等．流域水生态承载力研究的起源和发展[J]．长江流域资源与环境，2011，20（2）：203-210.
- [12] 宋策，李靖，周孝德．基于水生态分区的太子河流域水生态承载力研究[J]．西安理工大学学报，2012，28（1）：7-12.
- [13] 张星标，邓群钊．江西省水生态承载力分析[J]．南昌大学学报（理科版），2011，35（6）：607-612.
- [14] 刘子刚，蔡飞．区域水生态承载力评价指标体系研究[J]．环境污染与防治，2012，34（9）：73-77.

-
- [15] 周文华, 张克锋, 王如松. 城市水生态足迹研究---以北京市为例[J]. 环境科学学报, 2006 , 26 (9) : 1524-1531.
- [16] 刘鑫, 雷宏军, 晏清洪, 等. 基于生态需水量的城市水生态足迹研究[J]. 人民黄河, 2008 , 30 (6) : 41-43.
- [17] 孙景章, 王丽亚, 魏瑞霞. 唐山区域范围内的水生态足迹研究[J]. 河北理工大学学报 (自然科学版), 2011 , 33 (1) : 152-155.
- [18] 韩照祥, 吴丹丹, 吴任, 等. 江苏沿海地区淡水资源水生态足迹的动态变化[J]. 淮海工学院学报 (自然科学版), 2012 , 21 (2) : 34-38 .
- [19] 王俭, 张朝星, 于英谭, 等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用---以沈阳市为例[J]. 应用生态学报, 2012 , 23 (8) : 2257-2262.
- [20] 孟丽红, 叶志平, 袁素芬, 等. 江西省 2007-2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报, 2015 , 35 (1) : 256-261 .
- [21] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟[J]. 资源科学, 2006 , 28 (5) : 152-156.
- [22] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究---以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011 , 33 (6) : 1083-1088.
- [23] 闵庆文, 焦雯裙, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹[J]. 资源科学, 2011 , 33 (2) : 195-200 .
- [24] 焦雯裙, 闵庆文, 李文华, 等. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J]. 资源科学, 2014 , 36 (11) : 2392-2399.
- [25] JIAO W J , MIN Q W , CHENG S K , et al . The Waste Absorption Footprint (WAF) : A methodological note on footprint calculations[J]. Ecological Indicators, 2013 , 34 : 356-360 .
- [26] 焦雯裙, 闵庆文, 李文华. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用[J]. 应用生态学报, 2015 , 26 (4) : 1041-1048.
- [27] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001 , 21 (1) : 30-34.
- [28] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析---以广州为例[J]. 地理研究, 2003 , 22 (5) : 654-662.
- [29] 焦雯裙, 闵庆文, 成升魁, 等. 污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用---以太湖流域上游湖州市为例[J]. 生态学报, 2011 , 31 (19) : 5599-5606.
- [30] JIAO W J , MIN Q W , FULLER A M , et al . Evaluating environmental sustainability with the Waste Absorption Footprint (WAF) : An application in the Taihu Lake Basin , China [J]. Ecological Indicators, 2015 , 49 : 39-45 .