

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

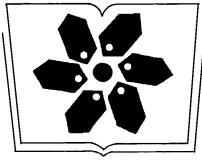
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201209231344

张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析. 生态学报, 2013, 33(13): 4111-4124.

Zhang Y, Zhang H P. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4111-4124.

基于生态系统服务的广西水生态足迹分析

张 义^{1,2}, 张合平^{1,*}

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 河池学院经济与管理系, 宜州 546300)

摘要: 针对传统生态足迹对于水域仅考虑渔业生产功能的缺陷, 研究者提出了水生态足迹。但当前水生态足迹基础理论与模型均存在较大不足。为此, 提出了基于生态系统服务的水生态足迹概念和模型, 并以 2003—2010 年的广西为例进行了计算与分析。结果表明: (1) 水域-渔业账户中, 淡水渔业生态足迹呈上升趋势, 淡水渔业生物承载力较高且比较稳定, 淡水渔业生态盈余较多同时淡水渔业生态压力较小; (2) 水资源账户中, 淡水生态足迹先较快上升随后缓慢下降, 水资源承载力较高但 2007—2010 年波动幅度较大, 水资源生态盈余较多同时水资源生态压力较小; (3) 水环境账户中, 水污染生态足迹先缓慢上升随后大幅下跌之后逐渐回升, 水环境承载力变化趋势与水资源承载力相同, 绝大多数年份表现为水环境生态赤字和水环境生态不安全; (4) 淡水渔业生态压力 < 水资源生态压力 < 水环境生态压力, 淡水生态系统基本已处于生态不安全状态。模型克服了传统模型的诸多缺陷与不足, 是对广西近年来淡水生态系统服务供需及水生态安全状况的较客观全面的反映。

关键词: 生态系统服务; 水生态足迹; 水生态承载力; 水生态盈亏; 水生态压力; 广西

Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services

ZHANG Yi^{1,2}, ZHANG Heping^{1,*}

1 College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Department of Economics and Management, Hechi University, Yizhou 546300, China

Abstract: As for the shortage that only fishery production function was considered for water area by traditional ecological footprint, the researchers put forward the water ecological footprint. However, at the present, the basic theory and model of water ecological footprint were quite deficient. In order to solve the above problem, the paper proposed the concept and model of water ecological footprint based on ecosystem services and carried out relevant calculation and analysis with the example of Guangxi in 2003—2010. The results showed: (1) In the water-fishery accounts, freshwater fishery ecological footprint was in an upward trend; freshwater fishery biological carrying capacity was comparatively high and stable; freshwater fishery ecological surplus was more while its ecological pressure was less. (2) In the water resources accounts, freshwater ecological footprint rose more quickly at first and then fell slowly. The carrying capacity of water resources was higher but the fluctuation range in 2007—2010 was larger. Water resources ecological surplus was more while their ecological pressure was less. (3) In the water environment accounts, water pollution ecological footprint rose slowly, and then fell greatly and finally picked up gradually. The trend of water environment carrying capacity was consistent with the water resources carrying capacity. The results showed water environment ecological deficit and ecological insecurity in most years. (4) Freshwater fishery ecological pressure < water resources ecological pressure < water environment ecological pressure. Freshwater ecosystem had basically been in the state of ecological insecurity. The model of this paper overcame the many flaws and shortcomings of the traditional models. The former was a more objective and all-sided reflect on the

基金项目: 广西教育厅科研项目(201106LX573)

收稿日期: 2012-09-23; 修订日期: 2013-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hepzhang@sina.com.cn

supply-demand of freshwater ecosystem services and water ecological security situation of Guangxi in recent years.

Key Words: ecosystem services; water ecological footprint; water ecological carrying capacity; water ecological surplus/deficit; water ecological pressure; Guangxi

生态足迹(EF)分析法是由加拿大生态经济学家 Rees 和 Wackernagel 于 20 世纪 90 年代初提出的一种以土地为度量单位的生态可持续性评估方法^[1]。该方法虽然视角新颖、形象生动、可操作性强,但仍存在诸多不足。例如它对于水域仅考虑其渔业生产功能而忽略了其他生态系统服务功能。为解决这一问题,研究者提出水生态足迹(WEF)^[2-3]。但当前 WEF 基本理论与模型均存在较大问题,这将影响该研究的深入开展。本文首先概述了当前 WEF 的基础理论和基本模型并分析了其存在的缺陷与不足,在此基础上提出了基于生态系统服务的 WEF 概念,并对后者的理论基础、模型构建和计算方法进行了具体阐述,接下来用新模型核算了广西 2003—2010 年的 WEF、水生态承载力(WEC)、水生态盈余或赤字(WES/WED)及水生态压力指数(WEPI),并与当前 WEF 模型计算结果进行了比较,以期对 WEF 研究有所裨益,同时为广西水域生态系统科学管理和有效利用及该区域可持续发展评估提供一定的参考依据。

1 WEF 基础理论、基本模型及缺陷

目前从生态经济角度评价水资源消耗主要有两种途径:一是 WEF,其定义为一定的人口和经济规模条件下维持水资源消费和消纳水污染所必需的生物生产性土地面积^[4];二是水足迹 WF,其定义为任何已知人口(1 个国家、1 个地区或 1 个人)在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源数量^[5]。两者之间虽有密切联系但也存在重大差别:WEF 核算的是狭义上的水资源(地表水和地下水),而 WF 核算的是广义上的水资源(地表水、地下水和土壤水);WEF 涵盖水资源消耗和水域生物生产消耗两方面,WF 只包括水资源消耗;WEF 通过均衡因子实现各部分的累加,WF 则是直接相加;WEF 的计量单位是 ghm^2 (全球公顷),WF 的计量单位为 m^3 ;WEF 的分析基于水域全球平均生产能力,WF 的分析则基于虚拟水^[6]。所以本文仅介绍 WEF 相关内容而未涉及 WF。

1.1 WEF 基础理论及缺陷

传统 EF 对于水域这类生物生产性土地类型考虑的仅是其水产品生产功能。为全面真实体现水域的用途,范晓秋^[2]提出在 EF 模型中建立水资源账户。这是不同于水域-渔业账户的第 7 类账户,用于描述水资源的生态环境和社会经济功能,其对应的土地类型是水资源用地。水资源用地建立在水资源均匀分布在地球表面的假设上,因而是虚拟土地类型^[2]。根据这一框架,黄林楠等^[7]、邱微等^[8]、王文国等^[9]、张军等^[10]、王俭等^[11]分别核算了江苏省、黑龙江省、四川省、疏勒河流域和沈阳市多年的水资源生态足迹。可以看出,这里的 WEF 包括水产品生态足迹和水资源生态足迹。洪辉^[4]则将传统 EF 模型中的水域账户扩大为水资源账户,它包括水产品生态足迹、淡水生态足迹和水污染生态足迹 3 个二级账户。水产品生态足迹反映人类对水域生物生产功能的占用,用水域面积表示;淡水生态足迹反映人类在生产生活过程中对淡水资源的消费,用水资源用地面积表示;水污染生态足迹则反映人类活动产生的超出水体承载能力的污染物对水资源的需求程度,也用水资源用地面积表示。基于这一核算体系,谭秀娟等^[12]、杨建军等^[13]、刘子刚等^[14]分别测算了中国(忽略了水污染生态足迹)、西安市、湖州市多年的水生态足迹。WEC 是指在维持水生态系统自身及其支持系统健康的前提下,基于一定的生态保护和承载目标,自然水生态系统所能支撑的人类活动的阈值^[14]。与 WEF 相对应,WEC 反映的是水生态系统服务的供给情况。WES/WED 是指 WEF 与 WEC 之间的差值,反映人类对水资源的利用是否超过其承载力。

WEF 基础理论和计算方法均来自 EF。EF 是利用生物生产性土地面积来度量一定人口通过利用生态系统服务的活动对地球产生的各种不同程度的影响,也就是说,当前的 EF 基于生物生产的 EF,当前的 EF 是基于生物生产的 EF^[15]。生物生产是指生态系统中的生物从外界环境中吸收生命过程所必需的物质和能量转

化为新的物质,从而实现物质和能量的积累^[16]。而人类在其生产生活中消费的水资源无法转换为生物生产土地,因为水本身不是一种生物生产性产品或服务。也就是说,水资源用地不能成为生物生产性土地,因此 WEF 定义存在重大缺陷。由此也可解释传统 EF 忽略水资源核算的原因:基于生物生产的 EF 根本无力将水资源的供给和消费纳入其核算框架。这种局限性源于 EF 理论的土地功能排他性假设^[17]。该假设认为每一类土地只具有唯一的生态系统服务功能,不重复计算同时提供多种生态系统服务的土地面积。此假设不仅明显违背土地功能多样性的客观事实,而且限制了对利用生态系统非生物生产性产品和服务的人类活动的衡量^[15]。淡水生态足迹和水污染生态足迹的提出是试图将水资源纳入 EF 核算,从而有利于传统 EF 理论和模型的完善,但研究者没有认识到基于生物生产的 EF 无法接纳基于非生物生产的 EF。

1.2 WEF 基本模型及不足

WEF 基本模型包括 WEF 计算模型、WEC 计算模型、WES/WED 计算模型 3 个部分。

1.2.1 WEF 计算模型

WEF 主要有两种计算模型,其一是^[2]:

$$EF_W = EF_{AP} + EF_{WR} \begin{cases} EF_{AP} = \Phi_W \times (C_{AP} \div P_{AP}) \\ EF_{WR} = \Omega_W \times (C_W \div P_W) \end{cases} \quad (1)$$

式中, EF_{AP} 和 EF_{WR} 分别为水产品生态足迹和水资源生态足迹 (hm^2); Φ_W 为水域全球均衡因子; Ω_W 为水资源全球均衡因子; C_{AP} 为消耗的水产品量 (t); C_W 为消耗的水资源量 (m^3); P_{AP} 为水产品世界平均生产能力 (t/hm^2); P_W 为水资源世界平均生产能力 (m^3/hm^2)。

第二种计算模型可表示为^[4]:

$$EF_W = EF_{AP} + EF_{FW} + EF_{WP} \quad (2)$$

$$EF_{WP} = \Omega_W \times (C_{WP} \div P_W) \quad (3)$$

$$C_{WP} = (C_i \div C_{oi} - 1) \times Q_i \quad (4)$$

式中, EF_{FW} 和 EF_{WP} 分别为淡水生态足迹和水污染生态足迹 (hm^2); C_{WP} 为污染物稀释净化需水量 (m^3); C_i 为实测河流第 i 种污染物浓度 (mg/L); C_{oi} 为达到要求水质标准规定的第 i 种污染物浓度 (mg/L); Q_i 为未达标废水排放量 (m^3)。 EF_{AP} 、 EF_{FW} 计算公式与第一种计算模型中的 EF_{AP} 、 EF_{WR} 计算公式相同。

1.2.2 WEC 计算模型

与第一种 WEF 计算模型对应的 WEC 计算公式是^[2]:

$$EC_W = BC_F + EC_{WR} \quad (5)$$

$$BC_F = 0.88 \Phi_W \times \Psi_F \times A_W \quad (6)$$

$$EC_{WR} = 0.4 \Omega_W \times \Psi_W \times (Q_W \div P_W) \quad (7)$$

式中, BC_F 和 EC_{WR} 分别为渔业生物承载力和水资源生态承载力 (hm^2); Ψ_F 为渔业产量因子; A_W 为研究区水域面积; 0.88 表示渔业生物承载力中预留 12% 用于生物多样性保护; Ψ_W 为水资源产量因子; Q_W 为水资源总量 (m^3); 0.4 表示水资源承载力中预留 60% 用于维护生态环境。与第二种 WEF 计算模型对应的 WEC 计算公式有两种:其一与式(7)完全相同^[14];另一种与式(7)的区别仅在于用 0.88 代替 0.4^[4]。

1.2.3 WES/WED 计算模型

可表示为^[14]:

$$ED_W(ES_W) = EC_W - EF_W \quad (8)$$

计算结果大于 0 是水生态盈余,表明该地区的水生态容量足以支持其生态负荷,水生态发展模式具有相对可持续性;计算结果小于 0 是水生态赤字,表明该区域自然生态系统所提供的水生态容量不足以支撑该地区人口消费模式和水平,区域发展处于相对不可持续状态;计算结果等于 0,则表明水生态安全处于临界状态^[14]。

1.2.4 WEF 基本模型的不足

第一种 WEF 计算模型仅核算人类对水域生物生产功能和淡水资源供应的占用情况,未测算人类对水环境净化功能的占用程度,因而存在明显缺陷。与之对应的水资源承载力虽保留 60% 用于保护生态环境,但这是基于水资源合理开发利用率,因而仍然是水量视角。第二种 WEF 计算模型虽明确提出了 EF_{WP} 及其计算方法,但仅核算点源污染而未考虑面源污染对水环境净化功能的占用^[4],而后者严重程度一般超过前者。另外,该模型仅测算未达标废污水占用的水资源用地^[4],而实际上达标废污水中主要污染物浓度仍然明显高于水质标准(如《污水综合排放标准》一级标准中 $COD \leq 60 \text{ mg/L}$ ^[18],而 III 类水质标准中 $COD \leq 20 \text{ mg/L}$ ^[19]),因而低估了其 EF_{WP} 。

EF 模型中的均衡因子值通过物质量评价法获得^[20],而 WEF 模型中的水资源均衡因子值却是通过价值量评价法获得^[2],不同方法求出的参数使其模型的有效性受到明显影响。另外,生态系统服务价值量更多的是反映生态系统服务的总体稀缺性而非其可持续性^[21],而 WEF 考虑的正是后者。

研究区水资源总量除以水资源全球平均生产能力得到的即是全球意义上的水资源用地面积,故水资源承载力计算公式中的水资源产量因子完全多余,其后果是:一方面低估了水资源贫乏地区的水资源承载力(因水资源产量因子小于 1),另一方面则高估了水资源丰富地区的水资源承载力(因水资源产量因子大于 1),因而不能准确反映研究区水资源可持续利用状态和程度。

总的 WEF 和 WEC 的计算也存在问题。3 个二级账户之和即为总的 WEF,表面上看这似乎没有问题,因为通过均衡因子可以实现对占用的不同类型土地的累加,但其前提是基于生物生产的 EF。水资源不是生物生产性产品或服务,故虽有水资源均衡因子也不能将水资源用地面积和水域面积相加。WEF 包括生物生产和非生物生产两大部分,与之对应的 WEC 也应包括这两部分,但目前的许多研究仅指 EC_{WR} 而不含 BC_F ^[4,14]。虽也有研究者认识到了这个问题,但却是将这两部分相加以获得总的 WEC^[2],这样处理的问题与上述总的 WEF 计算相同。

2 基于生态系统服务的 WEF 基础理论与模型构建

由上可知,要想把水资源纳入 EF 核算框架,从而全面衡量人类活动对水生态系统产生的各种影响,就必须摆脱传统 EF 理论基础的局限性,承认水域功能多样性的客观事实,将 WEF 构建于水生态系统服务功能之上,即基于生态系统服务的 WEF^[15]。本文将其定义为提供一定人口消费的水生态系统服务所需要的土地面积。

根据生态系统服务的定义,可将水生态系统服务定义为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^[22]。根据水生态系统提供服务的机制、类型和效用,把水生态系统的服务功能划分为提供产品、调节功能、文化功能和生命支持功能四大类。其中,产品供给功能主要包括人类生活及生产用水、水产品生产、水力发电等;调节功能主要包括水环境净化、水文调节、河流输送等;文化功能主要包括文化多样性、教育价值、灵感启发等;支持功能主要包括土壤形成与保持、光合产氧、提供生境等^[22]。

不是所有的水生态系统服务都能纳入 EF 核算,因为 EF 方法有几个前提假设,如:可获得资源的年消费量和产生的废物量;大部分资源消费量和废物量可折算为土地面积^[17]。据此可发现水生态系统服务中的文化功能和生命支持功能很难进行 WEF 核算。因为前者带有较大主观性,同时很难将其消费量换算为土地面积;而后者对人类的影响是间接的并且需要经过很长时间才能显现出来,同样很难获得此项功能的年消费量也很难将其消费量折算为土地面积。目前 WEF 研究已将水生态系统服务产品供给功能中的水产品生产、淡水供给纳入 EF 核算,其他产品供给功能暂时还没有找到较好的方法开展 EF 核算。虽已有研究核算了水电的 EF 和生态承载力^[23],但其将它们看作对耕地(建成地)的消费和供给,因而并非基于水生态系统服务,所以不能纳入本文的模型。调节功能中的净化水质已纳入 EF 核算,但该类功能中的其他功能目前难以纳入 EF 模型。

因此就目前而言,基于生态系统服务的 WEF 包括 EF_{AP} 或渔业生态足迹、 EF_{FW} 和 EF_{WP} 。由于核算的是

人类对三种不同水生态系统服务功能的占用,故将本文的 WEF 模型分为水域-渔业、水资源和水环境三类账户,每类账户均包括足迹、承载力、生态盈亏和生态压力指数四个项目。由于海洋生态系统服务不能全部囊括这三种功能,故本文的研究对象是淡水生态系统。水域-渔业账户就是传统 EF 的水域账户,由淡水渔业生态足迹、淡水渔业生物承载力、淡水渔业生态盈亏和淡水渔业生态压力指数构成。水资源账户由 EF_{FW} 、水资源承载力、水资源生态盈亏和水资源生态压力指数组成。其中, EF_{FW} 包括生产用水足迹、生活用水足迹和生态环境用水足迹。这里的生态环境用水是指人为措施调配的水量(主要包括河湖、洼淀、沼泽补水和绿化、清洁用水,不包括降水、径流自然满足的水量)^[24],因而也是对淡水资源供应的占用。水环境账户则包括 EF_{WP} 、水环境承载力、水环境生态盈亏和水环境生态压力指数。正如前述,当前 EF_{WP} 计算结果明显偏低,故本文将其定义为吸纳一定人口产生的水体污染物所需要的水资源用地面积。 EF_{WP} 中,本文选取具有代表性的氮、磷和有机物作为研究内容,以其中的最大污染足迹作为最终 EF_{WP} 。对同一类型承载力而言,应以其中的最小值作为最终承载力,故氮污染水环境承载力、磷污染水环境承载力和有机物水环境承载力中的最小值即为最终水环境承载力。基于前面提到的理由,水资源承载力和水环境承载力的计算公式均无产量因子。均衡因子试图把各种不同功能的土地通过一定的方法换算并加总以形成一个生态占用的整体概念,但研究者很难找到一个合理的均衡因子使得各类不同的生态占用被同度量化,而且同度量化后的数据含义也发生了变化^[25]。同时,水资源均衡因子也不同于传统 EF 中的均衡因子。因此模型舍去均衡因子,对不同类型的 WEF 只与相应的 WEC 比较而不进行均衡加总计算。同时,本文引入淡水渔业生态压力指数、水资源生态压力指数和水环境生态压力指数以分别反映研究区内陆水域渔业生态环境、水资源和水环境所承受的压力的相对大小,并以其中的最大值作为基于生态系统服务的水生态压力指数。基于生态系统服务的 WEF 模型可表示为:

$$ESEF_W \begin{cases} EF_{FF} = C_{FAP} \div P_{FAP} \\ EF_{FW} = C_W \div P_W \\ EF_{WP} = \max(EF_{NP}, EF_{PP}, EF_{CODP}) \end{cases} \quad (9)$$

$$EF_{WP} = \max(EF_{NP}, EF_{PP}, EF_{CODP}) \begin{cases} EF_{NP} = C_N \div P_N \\ EF_{PP} = C_P \div P_P \\ EF_{CODP} = C_{COD} \div P_{COD} \end{cases} \quad (10)$$

$$ESEC_W \begin{cases} BC_{FF} = 0.88 \times \Psi_{FF} \times A_{IW} \\ CC_{WR} = 0.4 \times (Q_W \div P_W) \\ CC_{WE} = \min(CC_{NP}, CC_{PP}, CC_{CODP}) \end{cases} \quad (11)$$

$$CC_{WE} = \min(CC_{NP}, CC_{PP}, CC_{CODP}) \begin{cases} CC_{NP} = 0.88 \times (Q_{WP} \times U_N \div P_N) \\ CC_{PP} = 0.88 \times (Q_{WP} \times U_P \div P_P) \\ CC_{CODP} = 0.88 \times (Q_{WP} \times U_{COD} \div P_{COD}) \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_{WP} = Q_W - (Q_R \times K) \quad (13)$$

$$ESED_W(ESES_W) \begin{cases} ED_{FF}(ES_{FF}) = EF_{FF} - BC_{FF} \\ ED_{WR}(ES_{WR}) = EF_{FW} - CC_{WR} \\ ED_{WE}(ES_{WE}) = EF_{WP} - CC_{WE} \end{cases} \quad (14)$$

$$ESEPI_W = \max(EPI_{FF}, EPI_{WR}, EPI_{WE}) \begin{cases} EPI_{FF} = EF_{FF} \div BC_{FF} \\ EPI_{WR} = EF_{FW} \div CC_{WR} \\ EPI_{WE} = EF_{WP} \div CC_{WE} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $ESEF_W$ 、 EF_{FF} 、 EF_{NP} 、 EF_{PP} 和 EF_{CODP} 分别为研究区基于生态系统服务的水生态足迹、淡水渔业生态足迹、氮污染水生态足迹、磷污染水生态足迹和有机物污染水生态足迹 (hm^2); C_{FAP} 为研究区淡水产品消费量 (t);

P_{FAP} 为全球淡水产品平均生产能力 (t/hm^2); C_{COD} 、 C_N 和 C_P 为分别为研究区排入水体的有机物、氮和磷量 (t), P_{COD} 、 P_N 和 P_P 为水域消纳有机物、氮和磷全球平均能力 (t/hm^2); $ESEC_W$ 、 BC_{FF} 、 CC_{WR} 、 CC_{WE} 、 CC_{NP} 、 CC_{PP} 和 CC_{CODP} 分别为研究区基于生态系统服务的水生态承载力、淡水渔业生物承载力、水资源承载力、水环境承载力、氮污染水环境承载力、磷污染水环境承载力和有机物污染水环境承载力 (hm^2); A_{IW} 为研究区内陆水域面积 (hm^2); Ψ_{FF} 为研究区内陆水域渔业产量因子; Q_{WP} 和 Q_R 分别为研究区用于接纳污染物的水量和取水量 (m^3); K 为研究区综合耗水率; U_N 、 U_P 和 U_{COD} 分别为 III 类水质标准中的总氮、总磷和化学需氧量含量上限 (mg/L) (如此处理的理由是 III 类水基本能够维持水体的生态服务功能,而低于此标准的水体的生态服务功能会衰退或丧失^[26]); $ESES_W/ESED_W$ 、 ED_{FF}/ES_{FF} 、 ED_{WR}/ES_{WR} 和 ED_{WE}/ES_{WE} 为研究区基于生态系统服务的水生态盈余或赤字、淡水渔业生态盈余或赤字、水资源生态盈余或赤字和水环境生态盈余或赤字 (hm^2); $ESEPI_W$ 、 EPI_{FF} 、 EPI_{WR} 和 EPI_{WE} 分别为研究区基于生态系统服务的水生态压力指数、淡水渔业生态压力指数、水资源生态压力指数和水环境生态压力指数,根据任志远等^[27]的等级划分标准, $ESEPI_W/EPI_{FF}/EPI_{WR}/EPI_{WE} < 0.5$ 时为安全状态, $0.5 \leq ESEPI_W/EPI_{FF}/EPI_{WR}/EPI_{WE} < 0.8$ 时为较安全状态, $0.8 \leq ESEPI_W/EPI_{FF}/EPI_{WR}/EPI_{WE} \leq 1$ 时为临界状态, $ESEPI_W/EPI_{FF}/EPI_{WR}/EPI_{WE} > 1$ 时为不安全状态。

3 实例研究:基于生态系统服务的广西 WEF 分析

3.1 数据来源和参数的取值

本研究中数据主要来自《广西统计年鉴(2004—2011)》、《广西壮族自治区水资源公报(2003—2010)》、《广西壮族自治区环境状况公报(2003—2010)》、《广西 2003—2010 年耕地面积统计表》(内部资料)、《中国畜牧业年鉴(2004—2011)》、《中国渔业年鉴(2004—2011)》。各参数取值见表 1。

表 1 模型参数及取值

Table 1 Model Parameters and their values

水资源全球 平均生产 能力 $/(10^3 m^3/hm^2)$	淡水产品 全球平均 生产能力 $/(kg/hm^2)$	广西内陆 水域渔业 产量因子	水域消纳 有机物全球 平均能力 $/(t/hm^2)$	水域消 纳氮全球 平均能力 $/(t/hm^2)$	水域消纳磷 全球平均 能力 $/(t/hm^2)$	III 类水质 标准中的 COD 含量上限 $/(mg/L)$	III 类水质 标准中的 TN 含量上限 $/(mg/L)$	III 类水质 标准中的 TP 含量上限 $/(mg/L)$
3.14 ^[28]	2338.6 [#]	1.91	0.062893 ^{&}	0.003145 ^{&}	0.000629 ^{&}	20 ^[19]	1.0 ^[19]	0.2 ^[19]

水资源全球平均生产能力 Average global production capacity of water resources; 淡水产品全球平均生产能力 Average global production capacity of freshwater products; 广西内陆水域渔业产量因子 Inland waters fishery yield factor in Guangxi; 水域消纳有机物全球平均能力 Average global ability of water dissolution of organic substances; 水域消纳氮全球平均能力 Average global ability of water dissolution of nitrogen; 水域消纳磷全球平均能力 Average global ability of water dissolution of phosphorus; III 类水质标准中的 COD 含量上限 Maximum COD content of the third water quality standard; III 类水质标准中的 TN 含量上限 Maximum TN content of the third water quality standard; III 类水质标准中的 TP 含量上限 Maximum TP content of the third water quality standard; #根据文献^[23]提供的数据和方法求得; & 根据文献^[19]中的 III 类水质标准中的 COD、TN 和 TP 含量上限转换而来

3.2 广西历年水域—渔业账户分析

2003—2010 年广西人均 EF_{FF} 虽有起伏但明显处于上升趋势, 年均增幅为 2.72% (表 2)。这反映了广西近年来对淡水产品消费需求的不断增加, 同时也说明对淡水渔业资源的开发利用强度明显在加大。同时期广西人均 BC_{FF} 逐渐下降但幅度较小, 年均降幅仅为 0.42% (表 2)。人口增长是主因, 因为总 BC_{FF} 不降反升, 这说明广西近年来在提高淡水渔业资源利用效率的同时也注重其生态保护。历年人均 BC_{FF} 均大于人均 EF_{FF} , 故表现为 ES_{FF} (表 2), 说明广西淡水渔业资源处于可持续利用状态, 其值走势与承载力基本一致。广西历年 EPI_{FF} 较小, 说明该地区内陆水域渔业生态环境安全度较高, 但总体呈缓慢下降趋势 (表 2)。

3.3 广西历年水资源账户分析

3.3.1 广西历年 EF_{FW} 分析

2003—2006 年广西 EF_{FW} 处于较快上升阶段, 人均值年均增长 3.48% (表 3), 这主要是广西经济社会发展对水资源的需求增加所致; 随后几年处于缓慢下降阶段, 人均值年均降幅为 1.93% (表 3), 说明近年来广

西水资源利用率有了显著提高。

表 2 广西历年水域-渔业账户

Table 2 Waters-fishery accounts in Guangxi from 2003 to 2010

年份 Year	人均淡水渔业生态足迹 Freshwater fishery ecological footprint per capita/hm ²	人均淡水渔业生物承载力 Freshwater fishery biological carrying capacity per capita/hm ²	人均淡水渔业生态盈余 Freshwater fishery ecological surplus per capita/hm ²	淡水渔业生态 压力指数 Freshwater fishery ecological pressure index
2003	0.0084	0.0270	0.0186	0.31
2004	0.0090	0.0268	0.0178	0.34
2005	0.0096	0.0267	0.0171	0.36
2006	0.0103	0.0265	0.0162	0.39
2007	0.0088	0.0262	0.0175	0.33
2008	0.0090	0.0268	0.0178	0.33
2009	0.0095	0.0266	0.0170	0.36
2010	0.0100	0.0262	0.0162	0.38

表 3 广西历年水资源账户

Table 3 Water resources accounts in Guangxi from 2003 to 2010

年份 Year	人均淡水生态足迹 Freshwater ecological footprint per capita/hm ²	人均水资源承载力 Water resources carrying capacity per capita/hm ²	人均水资源生态盈余 Water resources ecological surplus per capita/hm ²	水资源生态压力指数 Water resources ecological pressure index
2003	0.1827	0.4740	0.2912	0.39
2004	0.1895	0.4181	0.2285	0.45
2005	0.2023	0.4451	0.2428	0.45
2006	0.2018	0.4830	0.2812	0.42
2007	0.1976	0.3531	0.1554	0.56
2008	0.1956	0.5759	0.3803	0.34
2009	0.1897	0.3713	0.1816	0.51
2010	0.1862	0.4503	0.2641	0.41

在 EF_{FW} 各账户中,生产用水足迹是主体部分(历年值均超过 EF_{FW} 的 88%,但所占比例呈下降态势),所以两者走向一致(表 4)。生活用水足迹不到 EF_{FW} 的 10%,但其总值和人均值均呈明显上升趋势(表 4),主要是人口持续增加及人们对生活质量的要求提高所致。生态用水足迹所占比例很低,但逐渐增长的趋势比较明显(表 4),主要与人们对周围生态环境要求提高及广西加大水域的生态保护力度有关。

表 4 广西历年各类人均淡水生态足迹

Table 4 All kinds of freshwater ecological footprint per capita in Guangxi from 2003 to 2010

年份 Year	人均生产用水 足迹/hm ² Production water footprint per capita	人均农业用水 足迹/hm ² Agricultural water footprint per capita	人均工业用水 足迹/hm ² Industrial water footprint per capita	人均建筑业与服务 业用水足迹/hm ² Architecture industry and the service industry water footprint per capita	人均生活用水 足迹/hm ² Domestic water footprint per capita	人均生态环境 用水足迹/hm ² Ecological environment water footprint per capita
2003	0.1656	0.1384	0.0243	0.0029	0.0150	0.0021
2004	0.1710	0.1403	0.0271	0.0036	0.0165	0.0020
2005	0.1836	0.1505	0.0288	0.0043	0.0164	0.0023
2006	0.1828	0.1480	0.0299	0.0049	0.0167	0.0024
2007	0.1768	0.1409	0.0304	0.0054	0.0173	0.0036
2008	0.1737	0.1358	0.0326	0.0053	0.0184	0.0035
2009	0.1676	0.1285	0.0338	0.0054	0.0185	0.0035
2010	0.1648	0.1254	0.0341	0.0054	0.0181	0.0033

生产用水账户中农业用水所占比例最大但不断下降,由 2003 年的 83.61% 降到 2010 年的 76.06%,这与近年来广西农业产值比重变化趋势一致;其总值和人均值则是先上升(2003—2005 年)后下降(2006—2010 年),总体呈降低趋势(表 4),主要归因于采用节水灌溉方式、开发利用雨水和地下水等途径。工业用水足迹则无论是所占比例还是人均值均是持续增大,2010 年与 2003 年相比所占比例由 14.66% 上升到 20.68%,人均值则增加了 40.3%(表 4),主要因为工业化进程加大了对水资源供应的占用。建筑业和服务业用水足迹所占比例和人均值也是明显上升,八年增加近一倍(表 4),这与近年来广西大力提高城镇化水平及第三产业比重密切相关。

3.3.2 广西历年 CC_{WR} 、 ED_{WR}/ES_{WR} 及 EPI_{WR} 分析

广西历年 CC_{WR} 走势表现为:先下降然后逐渐回升,2007 年陡然下降,之后波动幅度很大(表 3)。这主要是广西降水量变化所致(广西 CC_{WR} 与其降水量呈极显著的正比关系,相关系数达 0.91)。由于历年 CC_{WR} 明显大于 EF_{FW} ,故两者之差为 ES_{WR} 。因为 EF_{FW} 平均不到 CC_{WR} 的一半且变化幅度较小,故 ES_{WR} 变化态势与 CC_{WR} 一致(表 3)。可以看出,人均 ES_{WR} (表 3)较多,说明广西水资源可持续开发利用空间较大。 EPI_{WR} 居于 0.34—0.56 之间,但近 4 年起伏较大(表 3),反映了广西水资源安全度总体较高但近年来开始趋于不稳定。

3.4 广西历年水环境账户分析

3.4.1 广西历年 EF_{WP} 分析

EF_{CODP} 核算的主要是广西工业废水和城镇生活污水排放的 COD 所占用的水资源用地(表 5)。2003—2006 年广西 EF_{CODP} 处于快速上升时期,人均值年均增长 6.08%,反映了广西工业及社会的快速发展对环境的压力日益增加;之后不断下降,人均值年均降幅 4.87%,说明近年来广西控制点源污染成效显著,经济社会发展与环境的开始趋于和谐。在其二级账户中,工业账户值高于生活账户值,但两者的差距日益缩小,这主要由于工业账户值下降明显,说明今后要更加注重降低生活 EF_{CODP} 。

表 5 广西历年水环境账户 1

Table 5 Water environment accounts in Guangxi from 2003 to 2010 (part one)

年份 Year	人均有机物水污染 生态足迹/hm ² Organic pollutant water ecological footprint per capita	人均工业有机物 水污染生态足迹/hm ² Industrial organic pollutant water ecological footprint per capita	人均生活有机物 水污染生态足迹/hm ² Domestic organic pollutant water ecological footprint per capita	人均氮污染水 生态足迹/hm ² Nitrogen pollutant water ecological footprint per capita	人均磷污染水 生态足迹/hm ² Phosphorus pollutant water ecological footprint per capita
2003	0.3034	0.2048	0.0986	1.1821	0.6630
2004	0.3233	0.2256	0.1051	1.1606	0.6510
2005	0.3454	0.2145	0.1122	1.1998	0.7177
2006	0.3587	0.2178	0.1166	1.2105	0.7451
2007	0.3379	0.1933	0.1098	0.8970	0.7460
2008	0.3189	0.1764	0.1036	0.9425	0.7887
2009	0.3049	0.1619	0.0991	1.0018	0.8379
2010	0.2888	0.1519	0.0938	1.0198	0.8673

为避免重复计算, EF_{NP} 和 EF_{PP} 不再考虑点源污染所排放的 N 和 P ,仅核算水产养殖、耕地地面径流和禽畜养殖等非点源污染向水生态系统排放的 N 、 P 量所占用的水资源用地。

水产养殖主要考虑网箱养殖和围网养殖对水体的污染。根据广西历年淡水产品产量和表 6 即可估算历年内陆水域水产养殖向水体排放的 N 和 P ,由此得到广西历年内陆水域水产养殖 EF_{NP} 和 EF_{PP} (图 1)。两者均呈快速上升趋势,年均增幅分别高达 53.63% 和 51.36%,同时 EF_{NP} 略高于 EF_{PP} (2003 年除外)。

表 6 广西网箱(围网)养殖 TN/TP 排污系数

Table 6 TN/TP pollution discharging coefficient of cage/seine breeding in Guangxi

网箱养殖 TN 排污系数/(kg/t) TN pollution discharging coefficient of cage breeding	网箱养殖 TP 排污系数/(kg/t) TP pollution discharging coefficient of cage breeding	围网养殖 TN 排污系数/(kg/t) TN pollution discharging coefficient of seine breeding	围网养殖 TP 排污系数/(kg/t) TP pollution discharging coefficient of seine breeding
129.9 [*]	26.75 [*]	141.25 ^[31]	14.14 ^[31]

* 参考文献修订

利用表 7 和广西历年耕地面积可以获得该地区耕地历年 N、P 入河量,从而得到广西耕地历年 EF_{NP} 和 EF_{PP} (图 1)。两者均是先缓慢下降(2003—2006 年)后逐渐回升(2007—2010 年),但 EF_{NP} 明显高于 EF_{PP} ,说明耕地 N 流失对水体的污染更大。

表 7 广西耕地 TN/TP 输出(入河)系数^{*}

Table 7 TN/TP output coefficient and into the river coefficient of farmland in Guangxi

耕地 TN 输出系数/(t/km ²) TN output coefficient of farmland	耕地 TP 输出系数/(t/km ²) TP output coefficient of farmland	耕地 N/P 入河系数 N/P into the river coefficient of farmland
2.2 ^[32-33]	0.16 [*]	0.15 ^[34]

禽畜粪便流失是水体污染的另一污染源。根据王方浩等^[35]的方法及参数计算广西畜禽粪便产生的总量和其中的 TN/TP,同时做如下调整:1)由于粪尿中的 N/P 含量、入水率都有很大不同,故猪(牛)粪尿采用不同的排泄系数和含量系数分别计算,具体值见文献^[36];2)因为统计资料未区分鸡鸭,家禽粪便排泄系数和 N/P 含量采用文献^[36]中鸡鸭排泄系数及 N/P 含量的平均值。禽畜粪便在堆放及清洗过程中容易进入到水体中,本文中的入水率采用文献^[36]中的数值,其中马、驴、骡粪便污染物入水率取值与牛粪相同,兔粪便污染物入水率取值与家禽相同。确定上述参数(表 8)后,根据统计资料便能估算广西历年禽畜养殖向水体排放的 N 和 P 量,从而得到相应的禽畜养殖 EF_{NP} 和 EF_{PP} (图 1)。可以看出,两类足迹呈不同发展态势: EF_{NP} 在 2003—2006 年缓慢上升,2007 年迅速下降(降幅高达 30.06%),之后逐渐上升但仍明显低于前 4a 值,总体呈下降趋势; EF_{PP} 则增长明显(年均增长 3.89%),2007 年值仅略低于上年。 EF_{NP} 2003—2006 年变化的主要影响因子是猪(牛)出(存)栏数;2007 年值大幅下降的主因是牛存栏数的剧降减少了 17210397hm² EF_{NP} (同期家禽出栏数大增但仅增加了 2606119hm² 的 EF_{NP});之后虽家禽、猪等出栏数持续增加,但因牛存栏数增长缓

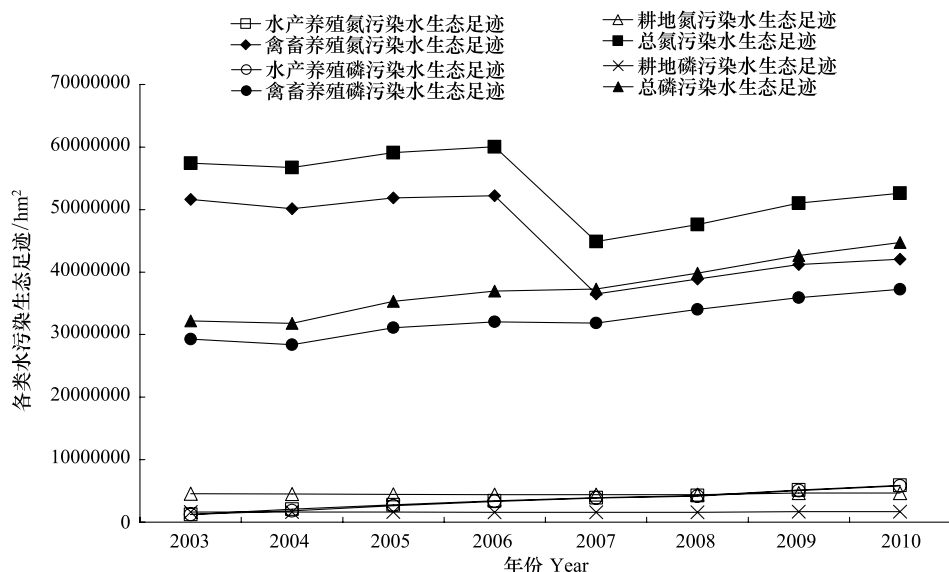


图 1 广西历年氮(磷)污染水生态足迹

Fig. 1 Nitrogen (Phosphorus) pollutant water ecological footprint in Guangxi from 2003 to 2010

慢,故其值仍低于前4年。 EF_{PP} 2003—2006年变化的主要影响因子是猪和家禽出栏数;2007年虽因牛、猪、羊存(出)栏数剧降导致减少7416886 hm^2 EF_{PP} (其中牛粪便产生的 EF_{PP} 下降最多,减少了6311659 hm^2),但同期家禽粪便同类足迹增加了7197867 hm^2 ,这主要是因为家禽粪便P含量远高于牛粪便;之后各类禽畜出栏数迅速增加(尤其是家禽、猪),因而该类足迹上升较快。历年禽畜养殖中 EF_{NP} 高于 EF_{PP} ,但两者的差距日益缩小。

将以上三部分的 EF_{NP} 和 EF_{PP} 分别相加,就得到了广西历年 EF_{NP} 和 EF_{PP} (图1和表5),其变化趋势与历年禽畜养殖 EF_{NP} 和 EF_{PP} 基本一致,这主要是因为后者对前者的贡献率历年均在80%以上。历年 EF_{NP} 是3种 EF_{WP} 中的最大值,因此它也就是历年最终 EF_{WP} 。

表8 畜禽粪便排泄系数、养分含量和入水率

Table 8 Animal excreta parameter and its nutrient content and into the water ratio

畜禽种类 Livestock category	排泄系数/(kg/a) Excreta parameter	TN 含量/% Total nitrogen content	TN 入水率/% Into the water ratio of total nitrogen	TP 含量/% Total Phosphorus content	TP 入水率/% Into the water ratio of total phosphorus
猪粪	398	0.588	5.34	0.341	5.25
猪尿	656.7	0.33	50	0.052	50
牛粪	7300	0.437	5.68	0.118	5.5
牛尿	3650	0.8	50	0.04	50
马	5900	0.378	5.68	0.077	5.5
驴、骡	5000	0.378	5.68	0.077	5.5
羊	870	1.014	5.3	0.216	5.25
家禽	26.25	1.042	8.47	0.579	8.42
兔	41.4	0.874	8.47	0.297	8.42

3.4.2 广西历年 CC_{WE} 、 ED_{WE} 、 ES_{WE} 及 EPI_{WE} 分析

广西历年 CC_{WE} 最小值为氮(磷)污染 CC_{WE} ,因此以之作为最终 CC_{WE} ,其变化趋势与广西历年 CC_{WR} 相同(表9)。由于绝大多数年份 EF_{WP} 大于 CC_{WR} ,故相应年份为 ED_{WE} (仅2008年为 ES_{WE}),其走势为先上升至最高值(2004年),随后不断下降至最低值(2008年),2009—2010年波动幅度较大(表9)。 EPI_{WE} 很大,其历年值表明广西绝大多数年份水环境安全均为不安全状态(仅2008年为临界状态),其变化趋势与 ED_{WE} 基本相同(表9)。

表9 广西历年水环境账户2

Table 9 Water environment accounts in Guangxi from 2003 to 2010 (part two)

年份 Year	人均氮污染 水环境承载力 Nitrogen pollutant water environment carrying capacity per capita/ hm^2	人均磷污染 水环境承载力 Nitrogen pollutant water environment carrying capacity per capita/ hm^2	人均有机物污染 水环境承载力 Organic pollutant water environment carrying capacity per capita/ hm^2	人均水环境 生态赤字 Water environment ecological deficit per capita/ hm^2	水环境生态压力指数 Water environment ecological pressure index
2003	0.9495	0.9495	0.9497	0.2326	1.24
2004	0.8267	0.8267	0.8268	0.3339	1.40
2005	0.9030	0.9030	0.9031	0.2968	1.33
2006	0.9852	0.9852	0.9853	0.2253	1.23
2007	0.6989	0.6989	0.6990	0.1981	1.28
2008	1.1898	1.1898	1.1899	-0.2473	0.79
2009	0.7421	0.7421	0.7422	0.2596	1.35
2010	0.9167	0.9167	0.9168	0.1031	1.11

4 讨论与结论

4.1 广西历年 WEF 分析

从水域-渔业账户来看, EF_{FF} 总体呈上升趋势,这主要是因为生活水平的提高增加了对淡水产品的需求从而导致对广西淡水生态系统生物生产功能占用的提高; BC_{FF} 走势平稳,反映了该地区近年来淡水生态系统生物生产功能比较稳定; ES_{FF} 较多,说明该地区淡水渔业资源处于可持续利用状态;历年 EPI_{FF} 均小于 0.4,表明该地区内陆水域渔业生态环境安全度高。从水资源账户来看, EF_{FW} 先快速上升,反映了广西经济社会发展对水资源的需求增加,之后缓慢下降,说明近几年来该地区水资源利用率有了显著提高; CC_{WR} 较高但 2007—2010 年起伏较大; ES_{WR} 较多,说明该地区水资源可持续开发利用空间较大; EPI_{WR} 总体上较低但历年值均大于 EPI_{FF} ,反映了该地区水资源安全度较高但低于其内陆水域渔业生态环境安全度。从水环境账户来看, EF_{WP} 很大(历年人均值的均值超过 1hm^2),反映了水体污染物过多占用了广西水环境净化功能,总体上表现为下降态势,其主要原因是禽畜养殖业内部结构的调整减少了对该功能的占用;历年人均 CC_{WE} 的均值为 0.9015hm^2 ,同时波动幅度较大;仅 2008 年表现为 ES_{WE} ,其他年份均为 ED_{WE} ,表明广西对其水域环境净化功能的利用处于不可持续状态; EPI_{WE} 总体上呈下降趋势但其值甚大(最小值为 0.7921,其他值均大于 1),表明广西绝大多数年份水环境不安全。 EPI_{WE} 是三类生态压力指数中的最大值,故以它表征广西 2003—2010 年淡水生态系统所承受的生态压力强度,因此可以认为近年来广西淡水生态系统已处于生态不安全状态。由此也可认识到,广西改变当前淡水生态系统安全状态的关键在于大力加强水污染防治和生态环境保护。

4.2 本文模型与传统模型比较和分析

两者的比较从两个层面展开:先是各账户分类比较;之后进行总体比较。第一种传统模型^[2](记为 TM_1)包括水域-渔业账户和水资源账户。第二种传统模型^[4,7](当 WEC 预留 12% 时记为 TM_{2a} ,当 WEC 预留 60% 记为 TM_{2b})虽在足迹端包含水域-渔业账户、水资源账户和水污染账户三类账户,但在承载力端却只有一类账户,故只能与本文模型(记为 OM)结果进行总体比较。

为了便于分类比较, TM_1 的计算结果排除了均衡因子。由于 OM 中的水域-渔业账户的计算方法及参数取值与 TM_1 完全相同,故两者的计算结果也完全一样。水资源账户中,OM 中的 EF_{FW} 与 TM_1 完全一致,其原因与上述水域-渔业账户相同。但 TM_1 中的 CC_{WR} 和 ES_{WR} 远大于 OM,而其 EPI_{WR} 明显小于 OM(表 3 和表 10)。这是 TM_1 中的 CC_{WR} 计算公式含有本不该有的产量因子(经计算广西水资源产量因子为 2.61),从而人为扩大了该地区 CC_{WR} 所致。因为 TM_1 不包含水环境账户,故不能进行此二级账户的比较。因此从分类比较角度来看,OM 是对广西 WEF、WEC、WES/WED 及 WEPI 更准确全面的核算。

表 10 TM_1 部分计算结果

Table 10 Partial results of the first kind of traditional model

年份 Year	人均水资源承载力/ hm^2 Water resources carrying capacity per capita	人均水资源生态盈余/ hm^2 Water resources ecological surplus per capita	水资源生态压力指数 Water resources ecological pressure index
2003	1.2370	1.0543	0.15
2004	1.0912	0.9017	0.17
2005	1.1617	0.9594	0.17
2006	1.2606	1.0588	0.16
2007	0.9215	0.7238	0.21
2008	1.5031	1.3075	0.13
2009	0.9692	0.7794	0.20
2010	1.1753	0.9891	0.16

计算过程中舍弃了均衡因子

WEPI 相对于 WES/WED 而言是更好的测度水资源可持续利用状况的指标^[12],故本文进行总体比较时

选用了该指标。当 OM 和传统模型(记为 TM)都加入均衡因子时,两者的 WEF 和 WEC 为各二级账户之和,其 WEPI 大小排序为: $TM_{2a} < TM_1 < TM_{2b} < OM$ (表 1)。当无均衡因子时,两者选其二级账户中的最大生态压力指数进行比较,其结果为 $TM_1 < OM$ (表 2 和表 9) (TM_2 在此情况下不能与之比较)。两种比较均表明: TM 下广西内陆水域生态安全度高,而 OM 下该地区内陆水域基本处于生态不安全状态。由于 WEF 模型中均衡因子存在较严重的问题,本文认为排除均衡因子的比较更具合理性。因为广西水体污染物占用的 EF 很高,而 TM 没有或只测算其中的很少一部分,同时 TM 也高估了该地区的 CC_{WR} ,故 OM 的测算结果更符合该地区的实际情况。

表 11 各种模型下的水生态压力指数
Table 11 Water ecological pressure index under various models

年份 Year	水生态压力指数(OM) Water ecological pressure index(OM)	水生态压力指数(TM_1) Water ecological pressure index(TM_1)	水生态压力指数(TM_{2a}) Water ecological pressure index(TM_{2a})	水生态压力指数(TM_{2b}) Water ecological pressure index(TM_{2b})
2003	0.96	0.15	0.08	0.18
2004	1.08	0.17	0.10	0.21
2005	1.04	0.17	0.10	0.22
2006	0.96	0.16	0.08	0.18
2007	1.04	0.21	0.11	0.24
2008	0.64	0.13	0.07	0.16
2009	1.07	0.20	0.10	0.21
2010	0.88	0.16	0.08	0.17

各模型计算过程均含均衡因子;内陆水域均衡因子取值 0.36^[37];水资源均衡因子取值 5.19^[7];广西水资源产量因子经计算为 2.61

4.3 本研究的创新及不足之处

本研究的创新之处主要有:(1)提出了基于生态系统服务的 WEF,该概念克服了基于生物生产的传统 WEF 定义的明显缺陷;(2)基于生态系统服务视角将淡水生态系统的生物生产、水资源供应和水环境净化功能纳入 EF 框架,从而能更全面地核算淡水生态系统服务的供给水平及人类活动对之占用的程度;(3)基于水环境净化功能定义 EF_{WP} 并以广西为例分别核算了该地区有机物污染、氮污染和磷污染占用的 WEF,从而扩展了传统模型该项目的核算范围,从而能比较全面地测算 EF_{WP} ;(4)本文模型舍弃均衡因子,从而避免了该参数带来的诸多问题;(5)本文模型弃用水资源产量因子,从而能比较准确地评价当地 CC_{WR} 和 CC_{WE} ;(6)本文模型建立了水域-渔业、水资源和水环境三类二级账户,能比较清晰地分析和认识三类水生态服务功能的需求与供给状况。同时以三类账户中的最大生态压力指数表示研究地区水生态系统承受的生态压力强度,相对于通过均衡因子实现的累加式生态压力评价更具科学性和合理性。

本研究也存在一些不足之处:(1)由于只能分类比较,因而不能对研究地区的 WEF、WEC 和 WES/WED 形成总体判断;(2)以三类账户中的最大生态压力表示水生态系统承受的生态压力,这种处理忽视了水生态系统的整体效应;(3)因为缺乏数据,淡水产品消费量没有进行贸易调整,同时 TN/TP 输出系数为参考值而非当地估算值,因而计算结果存在一定误差;(4)未能将更多的水生态系统服务纳入 EF 核算。

References:

[1] Liu Y H. Coordinated Degree Assessment of Eco-Economic System Based on EF Model. Beijing: China Environmental Science Press, 2009: 8-8.
[2] Fan X Q. Study on the Principle of Water Resources Ecological Footprint and Application in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
[3] Wu Z F, Hu Y H, Li D Q, Kuang Y Q. Analyzing and modeling temporal variation of water ecological footprint in Guangzhou city of China. Resources Science, 2006, 28(5): 152-156.
[4] Hong H. Study on the Principle of Water Resources Ecological Footprint in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.

- [5] Ma J, Wang D X, Lai H L, Wang Y. Water footprint-an application in water resources research. *Resources Science*, 2005, 27(5): 96-100.
- [6] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [7] Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, Fan X Q. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [8] Qiu W, Fan Q X, Zhao Q L, Yuan Y X. Calculation on ecological carrying capacity of water resources in Heilongjiang province. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(6): 1000-1003.
- [9] Wang W G, He M X, Pan K, Zhu Q L, Zhou Y, Fan Y, Hu Q C. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan province. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [10] Zhang J, Zhang R Z, Zhou D M. A study on water resource carrying capacity in the Shule river basin based on ecological footprints. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 267-274.
- [11] Wang J, Zhang C X, Yu Y T, Li F Y, Ma F. Calculation model of urban water resources ecological footprint and its application: A case study in Shenyang City of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2257-2262.
- [12] Tan X J, Zheng Q Y. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [13] Yang J J, Hong H, Fu N, Yang J Q. Water resource consumption statistics and calculation model for eco-environment footprint: A case study of Xi'an City. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(1): 122-126.
- [14] Liu Z G, Zheng Y. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: a case study of Huzhou. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [15] Min Q W, Jiao W J, Cheng S K. Pollution footprint: a type of ecological footprint based on ecosystem services. *Resources Science*, 2011, 33(2): 195-200.
- [16] Wang S H. *Regional Ecological Economy: Theory, Method and Application*. Beijing: China Development Press, 2008: 58-58.
- [17] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. A resolution to the conception of ecological footprint. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69-78.
- [18] State Environment Protection Administration. Integrated wastewater discharge standard (GB 8978—1996). Beijing: China Standards Press, 1998.
- [19] State Environment Protection Administration. Environmental quality standard for surface water (GB 3828—2002). Beijing: China Standards Press, 2002.
- [20] Liu D M. *A Study on Ecological Footprint on the Basis of the Theory of Sustainable Economic Development*. Beijing: China Environmental Science Press, 2007: 168-169.
- [21] Zhao J Z, Xiao H, Wu G. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290-292.
- [22] Ouyang Z Y, Zhao T Q, Wang X K, Miao H. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [23] Xie H Y, Wang L L, Chen X S. *Improvement of Ecological Footprint Evaluation Model and Application*. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 57-58, 92-92, 17-18.
- [24] "China water resources bulletin" editorial department. China Water Resources Bulletin preparation of technical outline. 2004. <http://wenku.baidu.com/view/5b9d8f1c227916888486d74f.html>.
- [25] Song X G. Study on the measurement of the ecological footprint. *Statistical Research*, 2003, 20(2): 44-47.
- [26] Li F, Sun R H, Yang L H, Chen L X. Assessment of freshwater ecosystem services in Beijing based on demand and supply. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1146-1152.
- [27] Ren Z Y, Huang Q, Li J. Quantitative analysis of dynamic change and spatial difference of the ecological safety: the case of Shaanxi province. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 597-606.
- [28] Zhang Y. Water crisis and water saving in the 21st Century China. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1997, 17(2): 2-9.
- [29] Guo L G, Li Z J. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China. *Aquaculture*, 2003, 226(1/4): 201-212.
- [30] Chen C, Huang D F, Qiu X X, Li W H. Survey and evaluation of agricultural non-point source pollution and prevention-and-cure countermeasures in middle and upriver of Minjiang Drainage area. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(supp): 368-374.
- [31] Yang Q X, Li W C. Environmental changes since foundation of Pen-fish-farming in East Taihu Lake. *China Environmental Science*, 1996, 16(2): 101-106.
- [32] Liang C D, Long T Y, Li J C, Liu L M. Importation loads of non-point source nitrogen and phosphorus in the three gorges reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 26-30.
- [33] Ma W G, Wang Y Y, Xiang B, Wang J S, Hu Y. Diversity and effect of diffuse source pollution load caused by land use change in the upper reach of Yangtze River Basin, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4): 791-797.
- [34] Shan Z J. *The Environmental Pollution control and Monitoring of Agrochemicals*. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 193-193.

- [35] Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, Ma L, Liu X L, Xu J X, Zhang F S. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [36] Nature and Ecology Department of State Environment Protection Administration. *Pollution Investigation and Control Measures of Large-Scale Livestock and Poultry Breeding Industry in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 25-25, 77-78.
- [37] WWF. *Living Planet Report 2004* [EB/OL]. <http://assets.panda.org/downloads/lpr2004.Pdf>.

参考文献:

- [1] 刘宇辉. 基于生态足迹模型的经济——生态协调度评估. 北京: 中国环境科学出版社, 2009: 8-8.
- [2] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [3] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 匡耀求. 城市水生态足迹变化分析与模拟. *资源科学*, 2006, 28(5): 152-156.
- [4] 洪辉. 基于生态足迹法的西安市水资源生态足迹研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [5] 马静, 汪党献, 来海亮, 王茵. 中国区域水足迹的估算. *资源科学*, 2005, 27(5): 96-100.
- [7] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [8] 邱微, 樊庆铨, 赵庆良, 袁一星. 黑龙江省水资源生态承载力计算. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(6): 1000-1003.
- [9] 王文国, 何明雄, 潘科, 祝其丽, 周芸, 樊毅, 胡启春. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [10] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价. *草业学报*, 2012, 21(4): 267-274.
- [11] 王俭, 张朝星, 于英谭, 李法云, 马放. 城市水资源生态足迹核算模型及应用——以沈阳市为例. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2257-2262.
- [12] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测. *生态学报*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [13] 杨建军, 洪辉, 付娜, 杨建琴. 水资源生态足迹消费账户及其计算模型——以西安市为例. *安全与环境学报*, 2010, 10(1): 122-126.
- [14] 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. *资源科学*, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [15] 闵庆文, 焦雯珺, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹. *资源科学*, 2011, 33(2): 195-200.
- [16] 王书华. 区域生态经济: 理论、方法与实践. 北京: 中国发展出版社, 2008: 58-58.
- [17] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 69-78.
- [18] 国家环境保护总局. 污水综合排放标准 (GB 8978—1996). 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [19] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准 (GB 3828—2002). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [20] 刘冬梅. 可持续发展理论框架下的生态足迹研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 168-169.
- [21] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物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.
- [22] 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.
- [23] 谢鸿宇, 王羚郦, 陈贤生. 生态足迹评价模型的改进与应用. 北京: 化学工业出版社, 2008: 57-58, 92-92, 17-18.
- [24] 《中国水资源公报》编辑部. 中国水资源公报编制技术大纲. 2004. <http://wenku.baidu.com/view/5b9d8f1c227916888486d74f.html>
- [25] 宋旭光. 生态占用测度问题研究. *统计研究*, 2003, 20(2): 44-47.
- [26] 李芬, 孙然好, 杨丽蓉, 陈利顶. 基于供需平衡的北京地区水生态服务功能评价. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1146-1152.
- [27] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. *地理学报*, 2005, 60(4): 597-606.
- [28] 张岳. 中国 21 世纪水危机与节水. *水利水电科技进展*, 1997, 17(2): 2-9.
- [30] 陈超, 黄东风, 邱孝煊, 李卫华. 闽江中上游流域农业面源污染调查评估及其防治技术探讨. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 368-374.
- [31] 杨清心, 李文朝. 东太湖围网养鱼后生态环境的演变. *中国环境科学*, 1996, 16(2): 101-106.
- [32] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 刘腊美. 三峡库区非点源氮磷负荷研究. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 26-30.
- [33] 马广文, 王业耀, 香宝, 王金生, 胡钰. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 791-797.
- [34] 单正军. 农用化学品环境安全评价与监控技术. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 193-193.
- [35] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 马林, 刘小利, 许俊香, 张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614-617.
- [36] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 25-25, 77-78.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jianet al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元