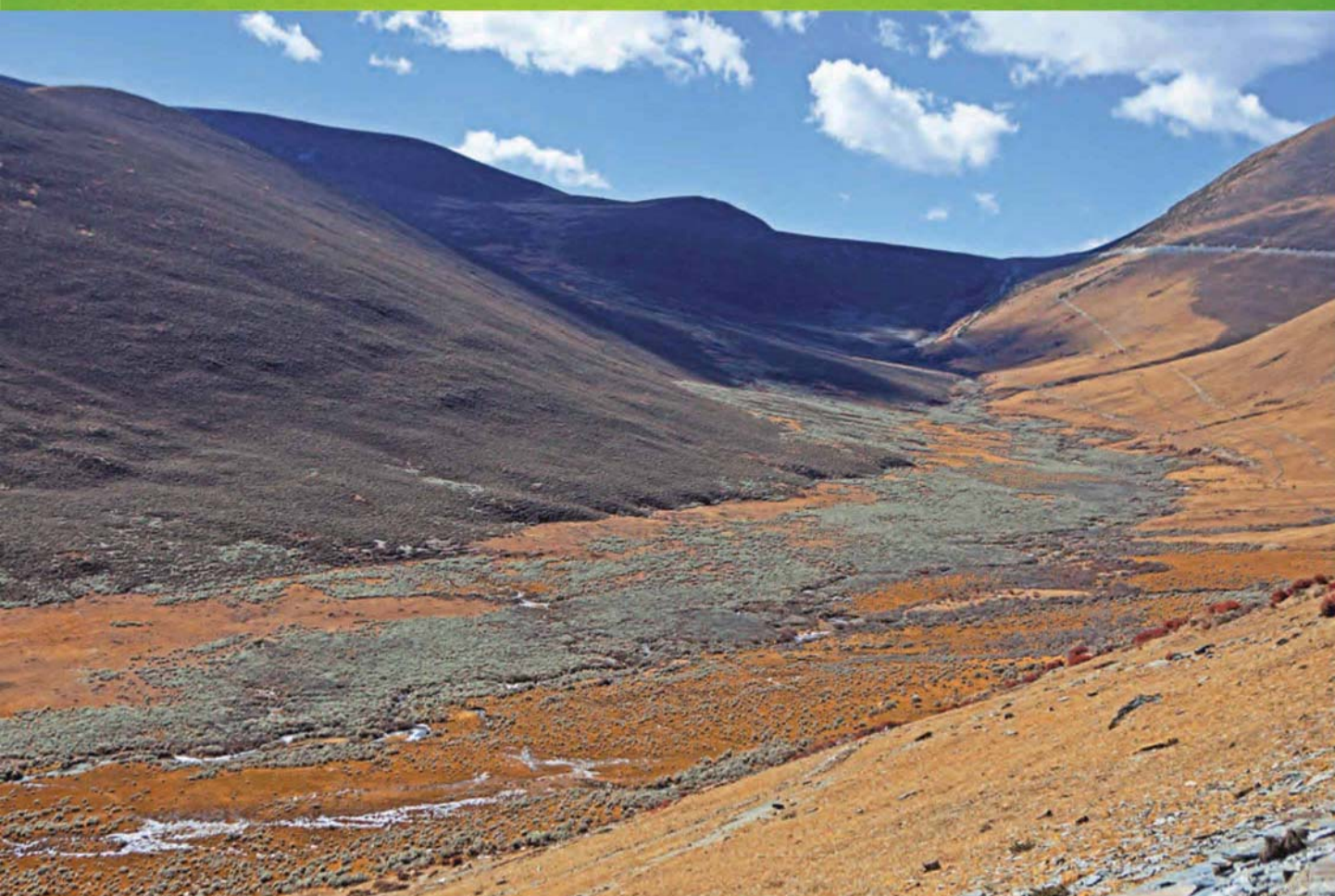


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
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 18 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 美国农业生态学发展综述 黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
- 水足迹研究进展 马 晶, 彭 建 (5458)
- 江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
- 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 董 蕾, 李吉跃 (5477)
- 生态化学计量学特征及其应用研究进展 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
- 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
- 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
- 华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
- 沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
- 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
- 珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
- 不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
- 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
- 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响 马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
- 香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
- 沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
- 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
- 基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
- 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
- 黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
- 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
- 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
- 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
- 基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
- 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
- 干旱荒漠区银白杨树干液流动态 张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
- 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
- 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
- 温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
- 断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
- 光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
- 绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭 波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈 纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘 影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚 昕, 朱广伟, 高 光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴 立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨 鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王 成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王 琴 孙 辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周 健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐 宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏 超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁 君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈 彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐 飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王 珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘 淼, 胡远满, 等 (5952)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09	



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

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/stxb201305131040

马晶, 彭建. 水足迹研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5458-5466.

Ma J, Peng J. Research progress on water footprint. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5458-5466.

水足迹研究进展

马 晶, 彭 建*

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 水为生命之源, 水资源的合理分配与科学管理是区域可持续发展与流域综合管理的核心环节; 水足迹作为一种全面核算人类活动对水资源真实占用的综合指标, 将人类消费终端与水资源利用密切关联, 为维护流域水资源安全、提高区域水资源利用效率提供了重要的科学依据, 已成为当前国际水资源管理的前沿研究领域。在明确水足迹及水资源生态足迹相关概念的基础上, 对比分析了水足迹与生态足迹、水资源生态足迹模型的异同, 明晰了过程、产品及区域等不同研究对象的水足迹核算方法, 系统梳理了产品和区域水足迹评价、基于水足迹的区域水资源安全研究、区域水足迹可持续性分析等水足迹主要研究内容的近今进展, 并展望了进一步的重点研究方向, 即水足迹综合研究、水足迹评价不确定性分析、水足迹与物质流核算的关联研究, 以及基于足迹整合的可持续发展多维测度等。

关键词: 水足迹; 生态足迹; 水资源生态足迹; 研究进展; 展望

Research progress on water footprint

MA Jing, PENG Jian*

Key Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The rational and appropriate allocation as well as scientific management of water resource is the cardinal and crucial part of the sustainability of regional development and integrated watershed management. Water footprint, as a comprehensive accounting indicator, reflecting the consumption of water resource due to human activities, connects human water expenditure directly and tightly with water utilization, which can translate human appropriation of fresh water into the volume or mass of water, and thus provides vital scientific analysis grounds of the maintenance of watershed water resource security and the improvement of regional water utilization efficiency, and has already become one of the frontier research fields of international water resources management. Firstly, based on the definitions of water footprint and water ecological footprint, which are the derivations of ecological footprint, and have already been the two main models used to calculate human use of water resource, this paper made comparative studies on water footprint, ecological footprint and water ecological footprint. Their similarities and differences are analyzed from the following four aspects: the origins and aims, fundamentals, footprint components and model applications. The results show that ecological footprint model, especially in its accounts setting idea, has significant impacts on both water footprint and water ecological footprint model, and water ecological footprint is regarded as a new emerged component of ecological footprint. However, compared with water ecological footprint, water footprint is a more comprehensive indicator to calculate the total annual volume of fresh water used to produce goods and services for consumption, and thus it can play a more important role in water resource management. Furthermore, the methods to calculate water footprint in process, product and region dimensions were explicated. Secondly, this paper reviewed the recent main research progresses on water footprint both in China and overseas from the following several aspects: (1) the assessments of water footprint in product and region. More water footprints of processes and products are calculated and analyzed by foreign scholars, while case study of a region's water footprint are booming all over the world; (2) regional water resource security researches based on deep analyses of water footprint and some derived indices;

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41130534)

收稿日期: 2013-05-13; 修订日期: 2013-07-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

(3) the sustainability assessments of regional water footprint by comparing the blue, green water footprint with available fresh water resource and comparing the grey water footprint with assimilative capacity of the watershed. Thirdly, this study proposed the key issues for further research, and the themes are as follows: (1) to make more comprehensive and integrated study on water footprint, including calculating and analyzing the quantity and structure of footprint, and then assessing the environmental, social and economic sustainability of water footprint, and finally making response plans, which are usually ignored; (2) to make further study on the uncertainty of water footprint calculation, which could enable scientists to make precise statements about the degree of confidence they have in their evaluation and simulation-based predictions; (3) to study the relationships between material flow accounting and water footprint, and make a joint research by integrating advantages from both of them; (4) to develop a multi-dimensional measure of sustainable development based on “footprint family”, including ecological footprint, carbon footprint and water footprint, then human appropriation of natural capital like land resource, water resource and energy resource can be fully accounted.

Key Words: water footprint; ecological footprint; water ecological footprint; research progress; prospect

水是人类生产生活最为重要的物质与能量源泉,区域社会经济的稳定发展离不开水资源的持续充足供给。随着全球人口和经济规模的扩大,人类对水资源的需求持续增长,而水资源的使用和消费一方面体现在实体水的使用,这一点被大众广泛认知;另一方面,水资源利用与人类消费终端密切联系,这一点却极少有人认识到^[1];由于水资源是许多农产品和工业产品生产所必需的基础性资源,大量的水以“看不见”的形式蕴藏在各类产品和服务的生产过程中,对这些产品消费的同时,便以虚拟水的形式消费了水资源。早在 1992 年 1 月,都柏林水与环境国际会议(ICWE)发表的《都柏林宣言》中就指出,水(尤其是淡水)是一种有限和脆弱的资源,对其开发和管理应该采用多种方式,而由于水的各种用途都具有竞争力,有着良好的经济价值,应被视为经济商品^[2]。因此,探索和构建有效的方法和原则,以高效且可持续地分配和使用水资源就显得尤为重要^[3]。

为了定量核算人类对自然资源的占用与地球承载力之间的关系,William Rees 和 Mathis Wackernagel 等在 20 世纪 90 年代初提出了生态足迹模型(EF)^[4-6],将人类对产品的消费换算为对耕地、牧草地、林地、生产性水域、建设用地和化石能源用地等 6 种生物生产性土地的占用。然而,生物生产仅是水资源的一种功能,不能代表水资源对人类的全部服务。借鉴生态足迹概念对于人类活动生态影响的直观表征,国内外学者相继提出了水足迹(WF)和水资源生态足迹(WEF)模型,以期更全面、真实地核算人类活动对水资源的占用状况。本文将对解析水足迹、水资源生态足迹的概念内涵及其与生态足迹模型的异同,明晰不同类型水足迹的核算方法,并在系统梳理国内外水足迹研究进展的基础上,展望未来发展趋势,以期推动水足迹研究的进一步深入。

1 水足迹与水资源生态足迹

1.1 水足迹

为了揭示人类生产生活消费与水资源利用之间的联系,以及全球贸易与水资源管理之间的联系,荷兰学者 Arjen Y. Hoekstra 在 2002 年荷兰代尔夫特举办的虚拟水贸易国际专家会议上首次明确提出了水足迹的概念^[2]。水足迹的概念建立在虚拟水(VW)或者嵌入水(EW)的概念之上,与隐性能源(EE)等概念相类似,也可被称作隐性水;而虚拟水的概念由英国学者 John Anthony Allan 在 1993 年提出,指产品和服务的生产过程中所使用的水^[7],例如,生产 1 kg 玉米、苹果和牛肉全过程需要消耗的水资源分别达到 1222 L、822 L、15415 L^[8]。某一产品或服务的虚拟水含量由生产该产品或服务所需的淡水体积(质量)定量表征,与虚拟水量相比,产品中的实体水常常微不足道。当农产品等水资源密集型产品从一个地方通过贸易手段到达另一个地方时,便形成了虚拟水贸易^[9-10]。揭示产品背后的虚拟水,有助于理解淡水资源的全球属性以及区际消费和贸易对水资源使用的影响,为更好地管理全球水资源打下基础^[10]。

基于虚拟水的概念,水足迹指在一定的物质生活标准下,生产一定人群消费的产品和服务所需要的水资源数量,它表征的是维持人类产品和服务消费所需要的真实水资源数量^[2]。消费某产品或服务时所消费的水资源量等于该产品的消费量乘以单位产品中的虚拟水含量。水足迹可以看作是对水资源占用的综合表征,有别于作用有限的传统取水指标^[11]。具体而言,水足迹主要由三部分组成,即储存在河流、湖泊、湿地以及浅层地下水层中的水资源(简称蓝水),储存在非饱和土壤层中并通过植被蒸散消耗掉的水资源(简称“绿水”),以及生产时污染的水(简称灰水)。因此,水足迹通过整合人类活动所消费产品或服务的整个生产链条中对水资源的使用和污染,定量核算产品或服务的潜在水资源占用状况,直观呈现人类消费和全球水资源占用之间的内在联系。

水足迹概念源于生态足迹,土地与水一样,不仅有资源供给的功能,也有消纳污染的效用^[1],两者都是极为稀缺的自然资源。各种类型的土地构成了社会经济系统与自然生态系统的交互界面,为了定量核算人类社会经济活动对自然资本的需求与

地球承载力之间的关系,加拿大生态经济学者 William Rees 于 1992 年提出生态足迹模型(EF),将人类对各类产品的消费换算至耕地、牧草地、林地、生产性水域、建设用地和化石能源用地等六大类生物生产性土地账户中,不仅考虑了生物生产功能,还考虑了吸收 CO₂ 等废弃物的功能,用土地面积表征人类活动对自然资本的占用,促进了人类活动与自然资源消耗及其生态影响的关联研究^[4-6,12]。尽管生态足迹模型只考虑了水域单一的生物生产功能,忽略了其资源供给和废物消纳的重要功能,生态足迹的研究视角及核算思路仍然为研究和管理自然资源与生态环境带来重要启示,将水视为人类与自然界交互的完整界面,水足迹概念仅从名称就可见其本身受到生态足迹的显著影响,并且沿用了生态足迹的账户核算思路。显然,WF 与 EF 的配合使用可以丰富人们研究自然资本占用的视角,并且深化了对水资源这一极度稀缺资源的研究。

1.2 水资源生态足迹

生态足迹模型从土地生物生产及承载力的角度定量核算了人类活动对生态系统的影响,然而水资源作为基础性自然资源 and 战略性经济资源,存在于生态环境保护和社会经济发展的多个环节,在生态足迹核算中却未被充分考虑。为了弥补生态足迹对于水域生态系统服务描述的局限,在六类生物生产性土地账户以外建立第七类土地类型——水资源用地,计算水资源生态足迹(WEF; 又称水生态足迹),用于描述水资源除了生物生产以外的生态环境服务和社会经济功能。在具体的核算中,往往假定水资源在一定的区域内均匀分布,即单位面积上水量相同,并将其概化为独立于其他账户以外的虚拟用地,以保证生态足迹模型中各类土地的互异性,将消费的水资源量按照一定规则折算为相应的土地面积,以该面积作为水资源账户与其他账户度量相统一的基础^[13-18]。

在生态足迹的核算框架下,首先确定水资源用地的均衡因子和产量因子,以水文学中的平均产水模数刻画区域内水资源的生产能力(m³/hm²),则水资源全球平均生产能力即为全球多年平均产水模数,区域水资源产量因子即为该区域水资源生产能力与全球水资源平均生产能力的比值,以产量因子区分不同国家、地区的水资源供给能力;然后,以 WWF 核算的均衡因子为基础,计算水资源的均衡因子;再次,通过一个地区的水资源总量与水资源的平均生产能力,计算水资源生态承载力;最终,将水资源生态足迹整合至生态足迹模型,即可实现对区域水土资源可持续性的综合评价。

1.3 水足迹与水资源生态足迹的差异

总体来看,水足迹与水资源生态足迹模型的基本原理和核算思路,均在较大程度上受到生态足迹模型的启示,两者既有联系又有区别(表 1)。二者的联系具体体现在:①关注水资源稀缺性。水足迹与水资源生态足迹均着眼于水的资源供给及其生态、社会、经济服务功能,并充分认识到水资源的稀缺性,旨在全面核算人类对水资源的占用,从而为水资源的科学管理提供决策支持;②账户核算思想。水足迹通常被分解为实体水与虚拟水两个二级账户,或蓝水、绿水、灰水足迹 3 个二级账户,在研究区域水足迹时又常被分解为内部水足迹、外部水足迹两个二级账户;而水资源生态足迹本身即作为传统生态足迹六大账户外的第七大账户,常又被细分为生活用水、生产用水、生态用水 3 个二级账户,或者地表水、地下水两个二级账户^[11, 19-23]。

表 1 生态足迹、水足迹与水资源生态足迹模型对比
Table 1 A Comparison of Ecological Footprint, Water Footprint and Water Ecological Footprint

	生态足迹 Ecological footprint	水足迹 Water footprint	水资源生态足迹 Water ecological footprint
源起与目的 Origins and Aims	1. 揭示人类对自然资本的占用与生态承载力之间的关联 2. 指示发展的可持续性	1. 真实而全面核算人类对水资源的占用 2. 揭示人类消费与水资源利用之间的联系 3. 揭示全球贸易与水资源管理之间的联系	1. 弥补生态足迹模型对水域功能描述的不足 2. 真实描述人类对水资源的占用与承载力之间的关联
基本原理 Fundamentals	1. 各种类型的土地为人类提供资源 2. 生态用地同化社会经济系统产生的污染物和废弃物 3. 人类对各种产品和服务的消费可换算为相应的生物生产性土地面积	1. 水是人类生产生活的重要资源 2. 水消纳社会经济系统产生的污染物和废弃物 3. 人类对各种产品和服务的消费可换算为相应的水资源体积(质量)	1. 水资源具有资源供给、生物生产以及生态功能 2. 人类对水资源的使用可换算为水资源用地面积和生产性水域面积
足迹构成 Footprint Components	耕地、牧草地、林地、生产性水域、建设用地和化石能源用地足迹	1. 实体水、虚拟水足迹 2. 蓝水、绿水与灰水足迹	1. 生活用水、生产用水与生态用水足迹 2. 地表水、地下水足迹
模型应用 Model Applications	1. 多尺度区域生态足迹核算与可持续性评价 2. 特定产业/部门生态足迹计算与分析	1. 不同尺度、特定产业/部门水足迹计算与分析 2. 区域水资源利用结构和特点分析 3. 水资源安全与水资源管理	1. 城市、区域水资源生态足迹计算与分析 2. 区域发展生态持续性评价

二者的区别则突出表现为以下 3 个方面:①核算视角。水足迹模型从生产和消费的角度出发,产品或服务的生产地和生产环境以及当地的消费结构共同决定了水足迹的规模和结构;而水资源生态足迹仍从传统的水资源供需角度出发,研究水资源的使用量(水资源生态足迹)和供给量(水资源生态承载力)之间的数量对比关系;②核算终点。水足迹模型将人类对水资源本身以及各种产品和服务的消费换算为相应的水资源体积,而水资源生态足迹则换算为水资源虚拟用地面积,并乘以相应的均衡因子,与其余六大账户相统一,共同构成研究区域的总生态足迹;③核算目的。水足迹指向消费、贸易结构与水资源利用之间的关联,从而达到合理使用水资源,切实维持全球水资源平衡的目的,而水资源生态足迹作为生态足迹的新增账户,其目的是与传统生态足迹模型整合,更加全面考虑人类活动对自然生态资本的占用,并对比生态承载力,指示区域发展的生态可持续性。

综合对比水足迹模型与水资源生态足迹模型,可以发现,水足迹的核算实质上包含了水资源生态足迹以及生产性水域生态足迹的核算内容,只不过由于两者的核算终点不同,结果无法直接对比;更进一步的,水足迹还考虑了隐藏在各种产品和服务中的虚拟水含量,因此对水资源的实际占用核算更为全面和真实。由于水资源短缺和合理用水一直都是人们关注的热点,水足迹模型自提出以来便发展迅速;并且,因为其与全球水资源使用效率直接关联,水足迹不仅在环境科学领域得到关注,而更多的被置于水科学和政策框架下研究^[1]。

2 水足迹核算方法

水足迹是从人类对水资源和水资源所提供的产品和服务的消费的角度,测算人类对水资源的真实需求和实际占用。水足迹的具体研究内容包括:①量化生产过程、产品、生产者或消费者的水足迹,或量化特定地理区域水足迹及其时空特征;②评价水足迹的环境、社会和经济可持续性;③制定响应方案^[24]。因此,水足迹核算的研究对象既可以是生产链中某个特定过程的水足迹,或是最终产品的水足迹,也可以是消费者、产品或某一经济部门的水足迹,更可采用地理视角分析不同空间尺度研究区内的水足迹,如流域、地市、省、国家或者全球。

(1) 过程水足迹

生产链的某个特定过程水足迹可以分解为蓝水足迹、绿水足迹及灰水足迹三者之和。其中,蓝水足迹是地表水和地下水的消耗指标,等于蒸发水、产品内蕴藏水分以及不能被重新利用回水量的总和;绿水足迹指源于降水,未形成径流或未补充地下水,但储存在土壤或暂时留存在土壤或植被表面的水,最终这部分水通过蒸发或植物蒸腾而消耗。绿水足迹与农业、林业产品密切相关,等于绿水蒸发量与蕴藏到产品内的绿水量之和;某个过程的灰水足迹指与该过程相联系的水污染程度指标,可通过排污量与污染物浓度与受纳水体自然本底浓度差的比值得到^[24-25]。

(2) 产品水足迹与消费者(群体)水足迹

产品水足迹指生产某种产品直接或间接消耗的淡水总量,包括生产链中所有过程水的消耗和污染,同样分为蓝水、绿水和灰水三部分。农产品、工业产品和服务端水足迹计算方法基本类似^[26-27],将产品生产系统的工艺步骤分解,然后采用链式求和法或阶段累积法计算。消费者水足迹指生产消费者消费的所有产品和服务所需的淡水消耗量和污染量,群体水足迹则由个体加和得到。消费者水足迹由直接消费和污染的水资源量(直接水足迹)与隐藏在所消费的产品和服务中的水资源量(间接水足迹)加和得到^[24]。

(3) 区域水足迹

明确研究区域的边界后,即可计算各尺度水文或行政单元的水足迹。研究区内的水足迹是发生在该区域的所有独立过程的水足迹总和,也可以是区域内所有个体消费者水足迹的总和。总体来看,核算方法可以分为自上而下法(综合法)和自下而上法(成分法)两种。其中,自上而下法是从产品生产的角度计算区域水足迹,等于区域内部水足迹加上虚拟水进口量,再减去虚拟水出口量(图 1)^[24]:

$$WF = IWF + VWFI - VWFE \quad (1)$$

式中,WF 为区域水足迹,IWF 为区域内部水足迹,VWFI 为通过产品进口贸易得到的虚拟水进口量,VWFE 为通过产品出口贸易得到的虚拟水出口量。

因为对进出口贸易数据的依赖性,自上而下方法适合省、国家等大尺度行政单元的水足迹核算。而在进出口数据不完备情况下,常采用自下而上法核算小尺度区域水足迹^[19]。自下而上法是从产品消费的角度计算区域水足迹,可分解为直接水足迹(实体水的使用)与间接水足迹(虚拟水的使用),而后者等于某种消费品的消费量乘以单位产品的虚拟水含量,即:

$$WF = WU + \sum P_i \times VWF_i \quad (2)$$

式中,WF 为区域水足迹,WU 为实体水使用量, P_i 为第 i 种终端消费品的消费量, VWF_i 为该消费品单位产品的虚拟水含量。

3 水足迹研究进展

自 2002 年国际上首次明确提出水足迹概念及其核算方法以来,目前国内外有关水足迹的研究主要围绕 3 个方面开展。

3.1 产品、区域水足迹评价

特定产品或区域的水足迹核算是近年来国际水足迹研究的重要内容之一。一种产品的水足迹指该产品的整个生产供应链中的用水量之和^[10],目前着重对全球农产品及其衍生产品、畜产品及其衍生产品、林产品以及生物能源的水足迹核算。

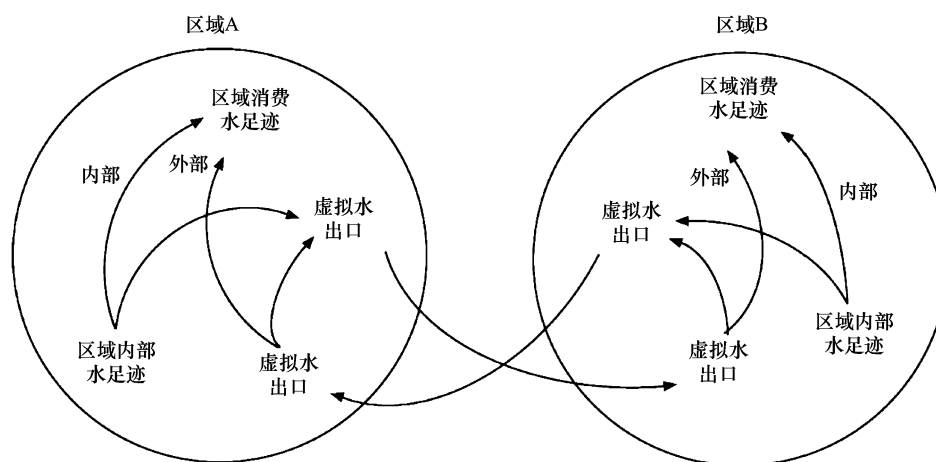
图1 自上而下的区域水足迹核算框架^[24]

Fig.1 Top-down Calculation Method of the Water Footprint of Regions

Mekonnen 与 Hoekstra 等分别核算了 1996—2005 年全球主要粮食及其衍生产品的水足迹^[26]、1996—2005 年全球畜产品的水足迹^[27], Gerbens-Leenes 等核算了产量占全球 80% 的作物的生物能源的水足迹, 包括生物热能、生物电能、生物乙醇以及生物柴油^[28]。此外, 也有学者计算了单个农产品如棉花、小麦、大米的水足迹规模及其构成^[25, 29-30]。相关研究结果表明, 各类产品中蓝水足迹与绿水足迹大致占水足迹总额的 80% 以上; 单位质量的农产品水足迹普遍低于动物产品; 农产品中水足迹最小的是糖料作物 (197 L/kg), 最大的是坚果类作物 (9063 L/kg); 而动物产品中水足迹最小的是牛奶 (1020 L/kg), 最大的则是牛肉 (15415 L/kg)。

区域水足迹评价是流域水资源管理的有效途径。国际上较多开展全球及国家尺度的水足迹核算, 也有少量学者完成了国家尺度以下的区域和流域水足迹核算^[31-32]。Hoekstra 和 Hung 最早定量核算了全球水足迹, 并对 1995—1999 各国虚拟水贸易平衡进行分析, 该项工作在 2007 和 2008 年由 Hoekstra 和 Chapagain 进行了完善^[10, 33], 而后 Hoekstra 和 Mekonnen 在考虑国家内部空间异质性的基础上完成了基于空间分辨率 5'×5' 的经纬网的全球水足迹计算, 进一步提高了全球水足迹核算的研究精度^[34]。研究表明, 1996—2005 年全球年均水足迹为 $9087 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ (蓝水足迹 11%, 绿水足迹 74%, 灰水足迹 15%), 其中农产品水足迹占绝大多数 (92%), 工业产品和生活用水则分别占 4.4% 和 3.6%; 中国、印度和美国是全球水足迹最大的 3 个国家, 分别达到了 1207×10^9 , 1182×10^9 , $1053 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$, 占全球水足迹总量的 38%; 中国 and 美国的工业水足迹分别占全球工业水足迹的 22% 和 18%; 全球灰水足迹 26% 来自中国^[26]。因此, 区际贸易流通, 特别是农产品贸易引起的水资源流动量不容忽视, 且我国水足迹总量巨大、产品生产过程水污染严重, 面临极大的水资源危机, 未来中国要在解决水污染问题的同时, 注重通过贸易手段缓解水资源压力。

在中国, 水足迹模型于 2003 年引入后, 涌现出了较多的区域水足迹核算及其空间分异与时间动态研究, 研究区以国家、省、市为主, 研究者大都在国外学者已有的产品水足迹核算结果基础上, 采用相对简化的方法计算区域水足迹, 其中龙爱华等对西北四省 (区) 2000 年水足迹总量及内部分异的研究^[21]、王新华等对中国 2000 年水足迹核算^[23]、孙才志等对 1997—2007 年中国各地区水足迹核算^[35]等研究较有代表性。近年来基于流域的水足迹核算与分析也逐渐出现, 傅春等核算了环鄱阳湖区 1989—2008 年的水足迹, 表明虽然水足迹仍处于盈余状态, 但水足迹的快速增长使得环鄱阳湖区面临较大的水资源危机^[36]; 潘文俊等完成了福建省九龙江流域的水足迹核算^[37]。而自 2009 年起, 特定地区的产品水足迹核算成为国内学者的关注热点之一, 邓晓军等基于水足迹理论方法和棉花生产水资源消费特征, 核算了 2005 年南疆地区棉花消费水足迹^[38]; 盖力强等计算了 2007 年华北平原地区 (河北、北京、天津) 小麦、玉米的虚拟水含量及其生长生产水足迹, 并就绿水的重要性和灰水对环境的不利影响进行了分析^[39]; 秦丽杰等结合水足迹核算理论方法和持续性大田试验研究, 核算了吉林省西部玉米生产水足迹, 研究表明玉米水足迹以绿水足迹为主 (占 80% 以上), 灰水足迹介于 10%—20% 之间, 而蓝水足迹不足 1%^[40-41]。总体来看, 我国区域水足迹评价研究显著多于产品和过程水足迹评价, 虽然成果较多, 但多数研究对核算方法不同程度的简化, 使得不同区域评价结果间的可比性不强; 产品和过程水足迹核算是区域水足迹核算的基础和前提, 且其规模和结构受地方生产条件影响显著, 不同地域同种产品的虚拟水含量差别较大, 而我国产品和过程的水足迹核算起步较晚, 且鲜见实证研究对核算结果的引用和实践, 因此亟需开展典型区域的产品和过程水足迹的系统核算, 提高核算的科学性和准确度, 从而为水足迹综合研究在我国的进一步发展打下坚实基础。

3.2 基于水足迹的区域水资源安全研究

水足迹是作为人类使用淡水资源量的衡量指标提出的, 因此早期的水足迹研究重点关注水足迹规模核算。随着研究的深

入,研究者构建了水资源自给率、水资源进口依赖度等衍生指标深入分析区域水足迹构成,并随着土地资源安全、粮食安全、能源安全等相关自然资源安全研究的持续关注,及日趋严峻的全球性水资源紧缺形势,进一步发展了水资源匮乏指数、水资源压力指数等定量指标^[42]。通过对区域内部水足迹、区域外部水足迹、区域可用水资源量等数值的比较分析,定量挖掘威胁区域水资源安全的关键因素,为解决水资源短缺、水污染等水资源安全问题制定切实可行的水资源战略提供科学依据;此外,通过评价不同产业部门水足迹与虚拟水贸易的历史动态,表征水资源的配置路径和消耗利用情况,有助于发现隐藏在产品消费背后的水资源使用问题,明晰水资源使用环节与真实水资源占用之间的关系。

区域间的贸易往来带动了虚拟水贸易,农产品等水资源密集型产品从富水地区向缺水地区的流动,有助于保障区域水安全,维护大尺度区域水资源平衡。Mekonnen 等的研究表明,1996—2005 年由产品贸易引起的全球虚拟水贸易量为 $2320 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$,其中农产品及其衍生品虚拟水贸易量占 76%,说明区域间贸易往来,特别是农产品贸易引起的水资源流动量不容忽视^[26]。龙爱华等在分析了西北四省水足迹内部差异的基础上指出,产品形式的虚拟水贸易是平衡水资源短缺、维持区域水安全的有效工具^[21]。马静等研究表明,我国水资源自给率极高,水足迹区域差异显著,东北、黄淮海、长江中下游平原是虚拟水净调出区,而华北、东南和华南为主要的调入区^[11,43]。陈俊旭等通过核算北京市水足迹发现,北京市水资源短缺率为 37%,对外依存度为 43%,全市水资源压力较大,用水优化、虚拟水引入是维护北京市水资源安全的根本对策^[44]。蔡振华等对比分析了甘肃省 1997、2002 和 2007 年第一、二、三产业部门的虚拟水强度以及虚拟水贸易情况,发现甘肃省第一产业虚拟水强度最高但呈下降趋势,虚拟水贸易以净出口为主,尤其是第一产业,有必要调整产业结构及贸易格局、合理控制虚拟水出口,以缓解当地水资源短缺危机^[45]。

3.3 区域水足迹可持续性分析

将区域水足迹与淡水资源可用量进行比较,即可进行水足迹可持续性评价^[1]。其中,区域蓝、绿水足迹应与当地可利用蓝、绿水资源量比较,灰水足迹应与流域水体纳污能力比较,从而多角度评测区域水足迹可持续性^[24]。评价区域水足迹的可持续性首先要确定可持续性标准并进行量化,通常是根据实际水资源可用量和水环境条件确定阈值范围;其次确定水资源匮乏、水污染等水足迹不可持续的热点区域,以及该区域水足迹不可持续的时间范围;最后根据水资源短缺程度和水污染严重程度,明确水足迹可持续性问题的严重等级,进而根据具体需要分析热点区域产生的初级影响和次生影响,其中初级影响主要考虑径流、水位、水质因子,将水足迹对环境的影响可视化,而生物多样性、人类健康、相关部门经济产值等次生影响量化方法目前仍是一个很大的挑战,同时,利用初级影响评估结果科学估算水足迹的次生影响也是下一步需要重点解决的问题^[24]。

Van Oel 等、Kampman 等以及 Chapagain 和 Orr 最早比较了水足迹与当地实际可用水资源量,确定了水资源匮乏的热点区域^[31,46-47]。区域水足迹可持续性评价涵盖环境、社会和经济三方面可持续性,即应当保障区域不同利益人群正常生活的水资源使用(社会公平),通过经济有效的方式分配和利用水资源(经济高效),并将水质污染维持在流域水质标准阈限内(环境容限)。为此,相关学者构建了水足迹效益指数、水资源可持续性指数等定量评价区域水足迹可持续性^[42]。例如,耿涌等从水环境保护视角,提出了基于水足迹的流域生态补偿模型,量化流域生态补偿额度标准,为流域水资源的科学管理提供定量依据^[48];孙才志等基于 1997—2007 年中国各地区水足迹核算结果,采用基尼系数、锡尔指数分析中国水足迹强度的空间格局及其动态变化,研究结果表明中国中东西三大地带空间发展呈极化后趋同的态势,且灰水足迹强度地域差异最为显著^[35]。

4 水足迹研究展望

人类对水资源的使用不仅包括水资源的直接消耗和污染,更包括存在于终端消费产品各生产流程中的虚拟水;在全球高耗水产品贸易的推动下,淡水资源快速转变为一种全球性的稀缺自然资源^[34]。水足迹作为一种衡量社会经济活动用水量的综合指标,沿用了传统生态足迹的账户核算思想,将水资源使用与人类消费关联起来,丰富了水资源分配和管理的视角,对流域水资源有效管理具有重要指示意义。水足迹评价的基本步骤首先包括对生产过程、产品、生产者、消费者以及特定水文区域或行政区域的水足迹量化,然后将水足迹的数量规模和结构特征与研究对象的消费结构进行关联分析,最后以此为依据制定水资源优化管理方案。

相比于水资源生态足迹,水足迹可从生产和消费的角度更为真实、全面的核算人类对水资源的占用,从水足迹的可持续性判断人类对水资源占用的生态、社会、经济可持续性,评价区域虚拟水贸易对于缓解水资源压力的合理性。因此,水足迹概念提出 10 余年来,其基本原理、核算方法和实证研究在国内外得到了蓬勃发展,帮助人们认识和澄清了一些地区水资源分配、管理的现状和问题。然而,水足迹核算在实际操作和应用过程中仍存在较多问题,这些问题同时也是下一步的重点研究方向:

(1) 水足迹综合研究 综观国内外相关学者的学术研究成果,目前大部分研究还停留在水足迹核算阶段。Hoekstra 等完成了多种农产品、食品、日常用品和生物能源的水足迹核算,同时大量关于不同地理区域的水足迹核算也已完成^[49-50];2011 年 Hoekstra 等人出版的水足迹评价手册,作为水足迹评价的国际标准^[24],规范了水足迹中蓝水、绿水和灰水足迹的核算方法及步骤,极大地推动了全球水足迹核算研究。然而,鲜见国内学者参照该国际标准完成我国不同空间尺度水文、行政单元的水足迹评价,未来应进一步规范核算的账户设置及具体参数设定,以提高不同区域水足迹核算结果的可比性,方便对不同研究成果的整合,从而为水足迹评价等后续工作打好基础。此外,囿于资料和数据,国内现有的区域水足迹核算往往只考虑了主要产品

(如农产品)的蓝水足迹和绿水足迹,对灰水足迹核算几乎是空白。更为重要的是,水足迹评价并非以水足迹核算为其研究终点,评价的目的在于明确水足迹的数量规模与结构组成,以此为依据制定响应方案,进而指导区域或消费团体更加合理有效的利用水资源。水足迹的响应方案是消费者、生产者、投资者以及政府管理部门等多层次的责任共担方案,因此,唯有综合多利益群体的水足迹可持续方案,整合小至消费者的日常节水措施、大到国家贸易战略,才能达到借助水足迹核算这一方法,降低水足迹规模、优化水足迹结构、缓解水资源危机、提高水资源在全球范围的使用效率等实践目的。

(2)水足迹评价不确定性分析 不确定性一般理解为不确定性和可变性,广泛存在于自然界和人类社会。数值模拟技术和方法的兴起及蓬勃发展,在帮助人们更好地认识现实世界的同时,也成为了预测及决策的重要工具,并带来了不确定性分析等相关学科的出现,以证明其计算和预测结果的可靠性及准确性。水足迹作为一种量化维持人类产品和服务消费所需要的真实水资源数量的模型方法,为人们高效和科学管理水资源提供了重要决策依据。不确定性存在于水足迹评价的各个环节,从数据来看,底层统计数据等基础数据本身存在一定的误差和不确定知性,且几乎未见对其不确定性的定量描述^[34];从方法本身来看,部分数据的缺失,导致以经验值和平均值代替观测值等简化方案以及以现有数据推算缺失数据的替代方案的产生,增加了模型本身的不确定性。具体而言:过程水足迹核算是水足迹评价的基础,农业过程的耗水量通过输入气候、土壤、作物特征、灌溉量及化肥施用等参数进行模型模拟,参数敏感性不可知,带来评估结果的不确定性;工业过程一般通过取水数据与最终排放量的差值计算耗水数据,存在一定偏差;单位过程的水污染数据通常比较缺乏,因而这部分估算结果较为粗略,增加了核算结果的不确定性;在过程水足迹核算结果的基础上计算产品、消费者以及区域水足迹,不仅携带了过程水足迹本身的不确定性,又带来了舍入误差及算法误差的累积。因此,定量识别水足迹评价过程中不确定性的产生和传递路径,明晰影响不确定性的敏感因素及其调控途径,进而提升水足迹核算结果的可靠性及准确度,该工作关系到水足迹的应用前景,但在目前水足迹研究领域却鲜有涉及,是未来的重要研究方向之一。

(3)水足迹与物质流核算的关联研究 定量评估人类活动对自然生态系统支撑能力及其可持续性,是当前生态经济学与可持续发展研究的热点与前沿领域^[12];而物质流核算从实物质量出发,通过社会经济系统的物质输入、输出与贮存等物质流分析指标,定量分析人类社会经济系统与自然环境之间的物质交换,测度人类物质使用对自然环境的影响,是一种重要的区域生态可持续性评估方法^[51]。但是,已有的物质流核算大多对水资源账户考虑不足;据测算,区域实体水消耗往往仅占水资源消耗的极少部分,隐藏在产品或服务中的虚拟水占水资源总量的 90%以上^[33];而在物质流核算中,水资源账户基本未考虑虚拟水的消费,且对水资源的输出,即工业废水、生活污水排放后为消纳其携带的污染物所损耗的水资源量也未进行估算;因此,现有的物质流核算框架相对较为保守,未能全面纳入人类活动水资源消耗,有必要将水足迹核算与物质流核算系统整合起来,综合衡量人类活动对自然生态系统的影响。

(4)基于足迹整合的可持续发展多维测度 生态足迹、碳足迹、水足迹模型的相继创立,表明随着全球城市化、工业化的不断加速,定量表征人类活动对自然资本的占用及其对自然生态系统的干扰已成为可持续发展研究的核心环节;然而,人类利用自然资源的生态影响并不是相互独立的,彼此关联的人类活动同时影响着地球上不同的自然资源。因此,为了帮助决策者综合应对人类活动对自然环境影响的多种问题,规避单一治理方案对相关自然资源及其利用的不利影响,整合多种足迹指标势在必行。Alessandro 等在 2012 年首次提出了“足迹家族”的概念,并将其定义为多角度追踪人类活动对自然生态系统压力的一系列指标簇^[52]。基于生产者、消费者视角,生态足迹、水足迹、碳足迹分别核算了人类社会经济活动中的土地资源、水资源、能源等自然资本消耗,均从各自的角度定量探讨了资源供给特征、资源利用效率及资源消费阈限,通过对“足迹家族”相关指标的整合,有望实现一个鲁棒的、实用的区域发展生态可持续性多维综合评估。

References:

- [1] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 2008, 68(7): 1963-1974.
- [2] Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft, Netherlands: IHE, 2003: 13-23.
- [3] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 109-118.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 1996, 17(3): 195-215.
- [6] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [7] Allan J A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. *Groundwater*, 1998, 36(4): 545-546.
- [8] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [9] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of*

- Water Research Report Series No.11, UNESCO-IHE, Delft, 2002: 53-54.
- [10] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Oxford: Blackwell Publishing, 2008: 16-19.
- [11] 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.
- [12] Peng J, Wu J S, Jiang Y Y, Ye M T. Shortcomings of applying ecological footprints to the ecological assessment of regional sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2716-2722.
- [13] Fan X Q. Study on the Principle of Water Resources Ecological Footprint and Application in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Hohai University, 2005: 38-40.
- [14] 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.
- [15] 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): 152-15.
- [16] Hu Y H, Wu Z F, Li D Q, Zhuo M N. Measuring sustainable development of water resources with aquatic ecological footprint in Guangzhou based on ARIMA model. *Ecology and Environment*, 2006, 15(1): 94-98.
- [17] 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.
- [18] Tai S S, Zhang W D, Hu Y M, Liu M. Ecological footprint and water footprint of Dalian City. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1596-1600.
- [19] Wang X H, Xu Z M, Li Y H. A rough estimate of water footprint of Gansu province in 2003. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 115-121.
- [20] Liu M, Xu X Y, Wang H R, Wang F. Water footprint and spatial-temporal analysis of Hebei province based on virtual water theory. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 1022-1034.
- [21] Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Estimate and analysis of water footprint in northwest China, 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 692-700.
- [22] Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q, Su Z Y. Primary estimation of water footprint of Gansu province in 2000. *Resources Science*, 2005, 27(3): 123-129.
- [23] Wang X H, Xu Z M, Long A H. Estimation of water footprint of China in 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 774-780.
- [24] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London: Routledge, 2011.
- [25] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7): 1259-1276.
- [26] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series No.50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2011: 17-22.
- [27] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401-415.
- [28] Gerbens-Leenes W, Hoekstra A Y, van der Meer T H. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(25): 10219-10223.
- [29] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 186-203.
- [30] Chapagain A M, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [31] Kampman D A, Hoekstra A Y, Krol M S. The water footprint of India. Value of Water Research Report Series, 2008, (32): 1-152.
- [32] Zeitoun M, Allan J A, Mohieldeen Y. Virtual water 'flows' of the Nile Basin, 1998—2004: A first approximation and implications for water security. *Global Environmental Change*, 2010, 20(2): 229-242.
- [33] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 35-48.
- [34] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 109(9): 3232-3237.
- [35] Sun C Z, Liu Y Y, Chen L X, Zhang L. The spatial-temporal disparities of water footprints intensity based on Gini coefficient and Theil index in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [36] Fu C, Ouyang Y, Chen W. Evaluation of dynamic changes of water footprint in the area around the Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(12): 1520-1524.
- [37] Pan W J, Cao W Z, Wang F F, Chen J S, Cao D. Evaluation of water resource utilization in the Jiulong River basin based on water footprint theory. *Resources Science*, 2012, 34(10): 1095-1912.
- [38] Deng X J, Xie S Y, Cui T S, Li Y, Li H. Research of the water footprint of cotton consumption and its effect on ecological environment in southern of Xinjiang. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(2): 176-180, 185-185.
- [39] Ge L Q, Xie G D, Li S M, Zhang C X, Chen L. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the North China Plain. *Resources Science*, 2010, 32(11): 2066-2071.
- [40] Qin L J, Jin Y H, Duan P L. Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7375-7382.
- [41] Qin L J, Jin Y H, Duan P L. Production water footprint of maize in the west of Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8):

1020-1025.

- [42] Qi R, Geng Y, Zhu Q H. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26 (3): 486-495.
- [43] Ma J, Wang D X, Hoekstra A Y. Virtual water trade and interbasin water transfer. *China Water Resources*, 2004, (13): 37-39.
- [44] Chen J X, Zhang S F, Hua D, Long A H, Chen B. A study on water resources guarantee in Beijing City based on water footprint evaluation. *Resources Science*, 2010, 32(3): 528-534.
- [45] Cai Z H, Shen L X, Liu J G, Zhao X. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [46] Van Oel P R, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 2008, 69(1): 82-92.
- [47] Chapagain A K, Orr S. UK Water Footprint; the impact of the UK's food and fibre consumption on global water resources; Volume two: appendices. WWF-UK, Godalming, 2008: 31-33.
- [48] Geng Y, Qi R, Zhang P. A water footprint based model on river basin eco-compensation. *China Population Resources and Environment*, 2009, 19 (6): 11-16.
- [49] Van Oel P R, Hoekstra A Y. Towards quantification of the water footprint of paper: A first estimate of its consumptive component. *Water Resources Management*, 2012, 26(3): 733-749.
- [50] Kuiper J, Zarate E, Aldaya M. Water footprint assessment, policy and practical measures in a specific geographical setting, A study in collaboration with the UNEP Division of Technology, Industry and Economics. Water Footprint Network, Enschede, Netherlands, 2010.
- [51] Peng J, Wang Y L, Wu J S. Progress and prospect of material flow analysis in the ecological assessment of regional sustainable development. *Resources Science*, 2006, 28(6): 189-195.
- [52] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "footprint family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100-112.

参考文献:

- [11] 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.
- [12] 彭建, 吴健生, 蒋依依, 叶敏婷. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. *生态学报*, 2006, 26(8): 2716-2722.
- [13] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2005: 38-40.
- [14] 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.
- [15] 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): 152-155.
- [16] 胡永红, 吴志峰, 李定强, 卓慕宁. 基于 ARIMA 模型的区域水生态足迹时间序列分析. *生态环境*, 2006, 15(1): 94-98.
- [17] 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.
- [18] 邵姗姗, 张伟东, 胡远满, 刘森. 大连市生态足迹与水足迹. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1596-1600.
- [19] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价. *自然资源学报*, 2005, 20(6): 115-121.
- [20] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 王峰. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1022-1034.
- [21] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足迹. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700.
- [22] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 苏志勇. 甘肃省 2000 年水资源足迹的初步估算. *资源科学*, 2005, 27(3): 123-129.
- [23] 王新华, 徐中民, 龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 774-780.
- [35] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 张蕾. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321.
- [36] 傅春, 欧阳莹, 陈炜. 环鄱阳湖区水足迹的动态变化评价. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(12): 1520-1524.
- [37] 潘文俊, 曹文志, 王飞飞, 陈劲松, 曹娣. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价. *资源科学*, 2012, 34(10): 1095-1912.
- [38] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 李艺, 李晖. 新疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究. *水土保持研究*, 2009, 16(2): 176-180, 185-185.
- [39] 盖力强, 谢高地, 李士美, 张彩霞, 陈龙. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究. *资源科学*, 2010, 32(11): 2066-2071.
- [40] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响. *生态学报*, 2012, 32(23): 7375-7382.
- [41] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究. *地理科学*, 2012, 32(8): 1020-1025.
- [42] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 486-495.
- [43] 马静, 汪党献, Hoekstra A Y. 虚拟水贸易与跨流域调水. *中国水利*, 2004, (13): 37-39.
- [44] 陈俊旭, 张士锋, 华东, 龙爱华, 陈博. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究. *资源科学*, 2010, 32(3): 528-534.
- [45] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 赵旭. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6481-6488.
- [48] 耿涌, 戚瑞, 张攀. 基于水足迹的流域生态补偿标准模型研究. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(6): 11-16.
- [51] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展与展望. *资源科学*, 2006, 28(6): 189-195.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jiangui, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar:nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liquan, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huaqun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《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 陈利顶

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 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 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