基于水足迹的长江流域市场化生态保护补偿机制研究

谢向向[1,2]，李翀[1,2*]，杨沛[1,2]，曹燕[1,2]，李玮[1,2]，孙凯丽[1,2]，黄趾东[1]

（1.中国长江三峡集团有限公司，湖北武汉 430014；2.长江经济带生态环境国家工程研究中心，湖北武汉 430014）

【摘　要】为破解长江流域生态保护补偿长期依赖财政投入、可持续性不足的难题，本文构建了基于企业水足迹的市场化生态保护补偿机制。研究以长江流域五大高耗水、高污染行业的80家上市企业为样本，运用水足迹理论量化其水资源消耗与污染负荷，综合采用生态系统服务价值法（设定补偿额度上限）和替代成本法（设定补偿额度下限）科学测算生态保护补偿额度区间，并结合企业支付能力进行约束调整。研究结果表明：①样本企业年水足迹总量达11.93亿m^3，行业差异显著，钢铁行业年水足迹量最高，以蓝水足迹为主，造纸、纺织等行业则以灰水足迹为主；②年生态保护补偿总额区间为41.09亿～106.64亿元，其间存在约65.55亿元的价值差距，反映出工程治理成本难以完全覆盖生态系统服务价值损失的问题；③对比根据支付能力进行调整前后的数据发现，钢铁行业仍承担最高补偿额，农副食品加工及制造业，以及酒、饮料和精制茶制造业财务承受能力较好，而部分造纸企业存在压力，凸显差异化补偿的必要性。研究进一步提出以水足迹补偿基金为核心，政府引导、企业付费、平台运营为运行模式的市场化生态保护补偿实施路径。研究可为长江流域构建企业主导、市场驱动的生态保护补偿机制提供理论支撑与可操作的实现路径。

【关键词】水足迹；市场化生态保护补偿；生态系统服务价值法；替代成本法；水足迹补偿基金；长江流域

【中图分类号】X322；X171.1；F273.1　　【文章编号】1674-6252（2026）03-0103-10

【文献标志码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2026.03.103

引言

伴随着高强度工农业活动的快速发展，长江流域正面临水资源短缺与水环境退化并存的严峻挑战，经济发展与生态保护的矛盾日益尖锐。面对流域覆盖范围广、利益相关者众多的局面，建立有效的生态保护补偿（以下简称“生态补偿”）机制已成为协调资源利用与生态保护关系、激励多元主体参与水资源保护与治理的重要制度安排[1]。党的十八大以来，我国将建立健全生态补偿机制作为建设生态文明的重要举措之一，并加大投入力度持续推进生态补偿工作。2021年9月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》，提出要“发挥市场机制作用，加快推进多元化补偿”。2024年发布的《生态

资助项目：国家重点研发计划资助项目“绿色小流域构建技术系统与应用示范”（2022YFC3203500）；中国长江三峡集团有限公司科研项目“长江中小型绿色流域构建模式技术研究与应用示范”（NBWL202200489）。

作者简介：谢向向(1991—)，女，博士，高级工程师，研究方向为环境政策与经济、生态产品价值实现，E-mail：xie_xiangxiang@ctg.com.cn。

***责任作者：**李翀(1971—)，男，博士，正高级工程师，研究方向为流域生态环境保护与可持续管理，E-mail：li_chong1@ctg.com.cn 。

保护补偿条例》再次提出要“充分发挥市场机制在生态保护补偿中的作用”“拓宽生态保护补偿资金渠道”。然而当前我国生态补偿资金主要依赖政府财政，社会资本参与不足，对政府财政造成很大压力，难以实现可持续的生态补偿 [2]。工业企业作为水资源消耗与污染的直接责任主体和自然资源的重要受益者，理应依据受益者付费、损害者赔偿原则承担相应补偿责任 [3]。因此，将高耗水、高污染企业纳入生态补偿研究框架，探讨其补偿标准与路径，对于拓宽生态补偿资金渠道具有重要意义。

在实践层面，国内外流域生态补偿探索已积累一定经验。国际上，德国与捷克共和国通过共建生态补偿基金协同治理易北河流域，美国纽约市通过对上游主要水源地所属流域进行横向资金支付来保障饮用水安全；在我国，新安江流域浙江、安徽两省以流域水质是否达标为依据形成了对赌协议，云南、贵州、四川三省共同出资设立赤水河流域生态补偿资金，江西、广东两省设立东江流域水环境横向补偿资金等典型模式。这些实践取得了显著成效，但其核心机制仍是政府主导的财政资金横向转移支付。以企业为直接责任主体与付费方的市场化补偿机制在国际上已有诸多创新，如厄瓜多尔基多市设立水资源保护基金，哥斯达黎加设立国家森林基金，法国毕雷矿泉水公司对水源地农户的长期补偿等；我国企业参与市场化生态补偿机制尚处于探索阶段。例如，新安江千岛湖下游企业与公益基金合作设立水基金，茅台集团设立专项资金用于赤水河流域生态补偿，可口可乐等企业出资通过公益组织参与流域水资源保护等案例。然而，这些企业的参与行为多呈现自愿、分散、项目化的特点，尚未形成拥有统一、科学量化标准，大规模、具有普遍约束力和可持续性的市场化生态补偿机制。

在学术研究层面，现有流域生态补偿研究多聚焦于以生态系统服务价值为补偿依据的上下游政府间的横向补偿机制 [4,5]，对企业角色的关注明显不足。少数研究尝试将企业纳入补偿体系，例如，Sun 等 [6]、Wei 等 [7] 使用差分博弈模型分析了政府与企业在生态补偿过程中的成本分摊和合作机制，郝春旭等 [8] 基于利益相关者意愿调查确定了赤水河流域酒企对上游农户的补偿标准，曾贤刚等 [9] 结合流域上游生态系统服务价值、发展权损失及农户受偿意愿界定了下游企业应支付的补偿区间，孙艳芝等 [10] 提出由政府和企业分别按照 70% 和 30% 的比例共同承担补偿额度。这些研究多从宏观生态效益或环境保护视角出发，侧重于基于定性或合作博弈的补偿标准测算 [11]，而基于企业活动实际造成的环境损害价值（即负外部性）进行生态补偿的研究仍较少 [12,13]。

企业涉水活动（水资源消耗、污水排放）对水资源与水环境产生的负外部性影响可分为三个层面 [14,15]：第一，工程价值，即水资源提取、净化、输配等过程的成本与合理收益等，这部分已通过供水基本水价支付。第二，资源价值，反映水资源稀缺性带来的经济租金，已通过水资源费 / 税支付。第三，环境价值，具体包括：①水资源消耗导致的生态服务功能损失，即企业取用洁净水资源，意味着相应水体所承载的调节、支持、文化等生态系统服务功能随之永久性或长期性丧失；②污水处理工程成本，将污水处理至达标排放的工程成本，已通过污水处理费体现；③污水排放造成的水环境容量占用成本，即使污水达标（地表水质量标准）排放，但水质标准浓度与受纳水体自然本底浓度仍存在差距，理论上将这部分污染物稀释到自然本底状态，需占用额外的自净容量。上述水资源消耗导致的生态服务功能损失和污水排放造成的水环境容量占用成本尚未被现有费用体系涵盖，应成为企业生态补偿的重点。

水足迹作为衡量水资源消耗与水环境负荷的综合指标，能够有效表征企业对水资源和水环境的负外部性影响，可为确定企业生态补偿标准提供科学依据。水足迹由 Hoekstra[16] 于 2002 年提出，是指一个国家、一个地区或一个人，在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量，是一个能体现消耗水量、水源类型、污染量和污染类型的多层面指标 [17]，包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹三个部分。其中，蓝水足迹（对地表水和地下水的消耗）和绿水足迹（对雨水等的消耗）可用于量化导致生态系统服务功能损失的水资源量；灰水足迹即理论上稀释污染物至自然本底浓度所需的水量 [17]，可作为衡量环境容量占用成本的依据。因此，基于水足迹的生态补偿，实质上是将企业尚未

承担的环境外部成本内部化，是对现有水资源付费体系的必要补充。部分企业探索通过资助社区安全饮用水供应、节水灌溉、中水回用、人工湿地尾水净化等补偿项目来减轻自身水足迹的影响、践行环境—社会—公司治理（ESG）理念，同时也提升了经济效益与水风险应对能力[18-20]。然而，当前将水足迹应用于生态补偿标准的研究多见于流域上下游区域间的横向补偿[21,22]，而在市场化企业生态补偿方面尚属空白。

综上所述，本研究所探讨的企业生态补偿，是基于“受益者付费、损害者担责”原则，对企业因水资源消耗与水污染导致的生态系统服务价值损失进行弥补，或对为恢复等效生态功能而投入的成本进行补偿，本质上是将生态影响的外部成本内部化的激励性制度安排，旨在推动生态补偿机制从现行政府主导、财政投入为主的模式，向责任主体多元化、资金来源多样化、补偿方式市场化的新机制转型。基于此，本研究以长江流域高耗水、高污染行业上市企业为研究对象，以水足迹为核心量化依据，构建一套企业生态补偿标准测算方法及市场化实施路径。研究采用生态系统服务价值法与替代成本法分别设定补偿额度的理论上限和下限，并结合企业经济支付能力将其调整至合理补偿区间，进而设计以水足迹补偿基金为核心的市场化实施路径。研究成果旨在引导企业承担水资源保护责任，同时为长江流域构建市场化、多元化、可持续的生态补偿机制提供理论支撑与决策参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 企业水足迹核算

本研究中企业水足迹是指支撑和运营一个企业所消耗或污染的淡水资源量[17]，核算边界为生产运营过程，核算方法主要参考 Hoekstra 的《水足迹评价手册》。

企业水足迹可分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹，可表示为：

$$WF=WF_{blue}+WF_{green}+WF_{grey} \quad (1)$$

式中，WF 为企业水足迹量，WF_{blue}、WF_{green}、WF_{grey}分别为蓝水足迹量、绿水足迹量、灰水足迹量。

其中，蓝水足迹指生产产品和服务所消耗的地下水和地表水资源量[17]，可用取水量与废水排放量的差值表示：

$$WF_{blue}=W_{infall}-W_{effluent} \quad (2)$$

式中，W_{infall}、$W_{effluent}$分别为取水量和废水排放量。

绿水足迹指生产过程中消耗的绿水资源量，绿水是指源于降水、未形成径流或未补充地下水，但储存在土壤或暂时储留在土壤或植被表面的水[17]。考虑到绿水足迹量相对较小，而且国家鼓励企业使用雨水等非常规水源，因此在补偿标准测算时暂不考虑绿水足迹量。

灰水足迹指以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准，将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水的体积[17]。根据 Hoekstra 等著的《水足迹评价手册》[17] 及已有研究[21-24]，一般来说，污水中含有多种形式的污染物，灰水足迹将由其中最关键的污染物所决定，即取各类污染物灰水足迹最大值。考虑到 COD、氨氮是工业废水中的主要污染指标，同时根据以往研究[25-27] 及数据的可获取性，本文仅考虑 COD 和氨氮两个指标进行测算。

第 i 类污染物的灰水足迹核算方法为：首先获取工业企业第 i 类污染物的水质标准浓度（C_{max-i}）与受纳水体自然本底浓度（C_{nat-i}），然后用第 i 类污染物排放量（Q_i）除以浓度差（$C_{max-i}-C_{nat-i}$），即

$$WF_{grey-i}=\frac{Q_i}{C_{max-i}-C_{nat-i}} \quad (3)$$

式中，WF_{grey-i}为第 i 类污染物的灰水足迹量；污染物水质标准浓度C_{max-i}由现行水环境质量标准决定，在本研究中该变量取《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中Ⅳ类水标准限值；C_{nat-i}为受纳水体自然本底浓度，指自然条件、无人为影响下水体中某种污染物的浓度，本研究中该指标取《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中Ⅰ类水标准限值。

最终企业灰水足迹取各类污染物灰水足迹最大值，计算公式为：

$$WF_{grey}=\mathrm{Max}（WF_{grey-i}） \quad (4)$$

1.2 生态补偿额度测算

生态补偿额度测算可采用意愿调查法、机会成本法、替代成本法、市场价值法、旅行费用法、收益还原法、生态系统服务价值法等多种方法[28]。本研究分别采用生态系统服务价值法和替代成本法，核算企业水足迹（涵盖水资源消耗与水环境污染）影响所应承担的理论生态补偿额。其中，生态系统服务价值法核算出的价值是水资源作为自然资本的全部服务功能损失，代表了生态保护的理想目标，故作为补偿额度的上限；替代成本法核算出的价值以替代环境项目减轻负外部性的最低经济成本表示，故作为补偿额度的下限。最后，结合企业支付能力等因素，调整并确定一个合理的补偿额度区间。

1.2.1 基于生态系统服务价值法的生态补偿额度测算

生态系统服务价值法认为企业补偿标准应等同于水足迹行为造成的生态系统服务价值损失。其中蓝水足迹体现对新鲜水资源的消耗，其补偿额度等于消耗的水资源量乘以单位水资源的生态服务价值，这部分价值涵盖水资源作为自然资产本身所具备的调节、支持、文化等服务功能的总和。灰水足迹表征为稀释污染物所需占用的水环境容量，主要指淡水资源，可通过水资源价值反映，其补偿额度等于占用的水环境容量乘以水资源单位市场价格（或影子价格）[21]，体现对稀缺环境资源占用所支付的“租金”。总的生态补偿理论额度应为上述两者之和。计算公式如下：

$$TC_{esv} = P_{esv} \times WF_{blue} + P_{water} \times WF_{grey} \quad (5)$$

式中，TC_{esv}为运用生态系统服务价值法时企业应补偿的资金额度；WF_{blue}、WF_{grey}分别为蓝水足迹量和灰水足迹量；P_{esv}为单位水资源的生态系统服务价值，参考郑阳等[29]的研究，取值为 25 元 /m³；P_{water}为单位水资源的市场价格，根据 2013 年《关于水资源费征收标准有关问题的通知》，取值为平均价格 0.2 元 /m³。

1.2.2 基于替代成本法的生态补偿额度测算

替代成本法即通过资助替代性环境项目的方式进行生态补偿。具体而言，对于蓝水足迹部分，企业可通过支持社区安全饮用水供应、开发新灌溉水源、推广雨水利用与高效灌溉技术、促进中水回用等措施，增加清洁水供应或减少取水量，实现对水资源消耗的补偿。对于灰水足迹部分，则可通过资助建设人工湿地、污水处理设施及开展湿地保护修复等项目，提升水质并增加水环境容量，从而实现对水环境污染的补偿。

基于上述思路，在替代成本法中，以替代项目的建设与运维成本作为补偿标准单价，企业水足迹补偿额度的具体核算方法如下：

$$TC_{cost} = \sum_{i}(C_{blue,i} \times WF_{blue,i}) + \sum_{j}(C_{grey,j} \times WF_{grey,j}) \quad (6)$$

式中，TC_{cost}为替代成本法下企业应补偿额度；i、j分别表示不同类型的蓝水足迹、灰水足迹补偿项目；$C_{blue,i}$为第 i 类蓝水补偿项目的单位建设与运维成本；$C_{grey,j}$为第 j 类灰水补偿项目的单位建设与运维成本；$WF_{blue,i}$为企业通过第 i 类项目所实现的蓝水补偿量；$WF_{grey,j}$为企业通过第 j 类项目所实现的灰水补偿量。

1.3 研究对象与数据来源

本文以长江流域造纸及纸制品业，纺织业，钢铁行业，农副食品加工及制造业，以及酒、饮料和精制茶制造业等行业上市企业为例开展研究。考虑到数据的可获取性，最终选取了 80 家样本企业，具体包括：14 家造纸及纸制品业上市企业，主要位于浙江省、上海市、湖南省、安徽省，营业总收入 760.34 亿元；16 家纺织业上市企业，主要位于浙江省、上海市、江苏省、安徽省，营业总收入 556.16 亿元；12 家钢铁行业上市企业，主要位于江苏省、江西省、浙江省、上海市、安徽省、四川省，营业总收入 8 877.55 亿元；23 家农副食品加工及制造业上市企业，主要位于浙江省、上海市、江西省、四川省、湖南省、湖北省，营业总收入 4 716.96 亿元；15 家酒、饮料和精制茶制造业上市企业，主要位于四川省、安徽省、江苏省、贵州省、湖南省、重庆市，营业总收入 4 217.97 亿元。

研究所用各样本企业 2024 年取水量、废水排放量、废水 COD、氨氮排放量来源于中国经济研究（CSMAR）数据库中国上市公司环境研究数据

库、各企业 2024 年度可持续发展报告或 ESG 报告、年度报告等，部分缺失数据根据企业所在省份工业取水定额、各行业水污染物排放标准、产品产量测算得出。各上市企业营业收入数据来源于各企业 2024 年度报告。

2 结果与分析

2.1 企业水足迹量

各样本企业水足迹量测算结果如图 1 所示。长江流域 80 家样本企业年水足迹总量为 11.93 亿 m^3，其中蓝水足迹量为 5.32 亿 m^3，灰水足迹量为 6.61 亿 m^3。分行业来看，14 家造纸及纸制品业、16 家纺织业、12 家钢铁行业、23 家农副食品加工及制造业，以及 15 家酒、饮料和精制茶制造业上市企业年水足迹总量分别为 2.416 2 亿 m^3、0.874 6 亿 m^3、4.109 0 亿 m^3、3.366 7 亿 m^3 和 1.159 6 亿 m^3。从水足迹的组成来看，钢铁行业企业水足迹中蓝水足迹占据主导，该行业企业绝对用水量基数较大；其余行业企业以灰水足迹为主，废水排放污染物的量较大，用于稀释污染物的水量也较高。

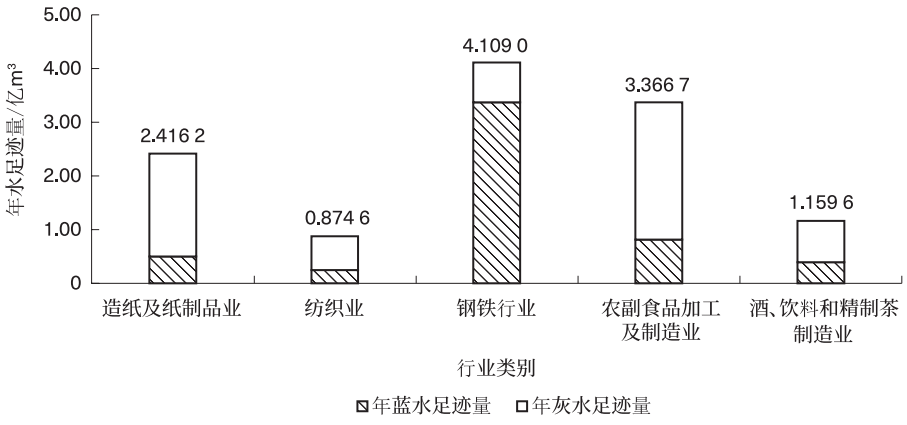

图 1 各行业上市企业年水足迹量

注：图中数据标注的是年水足迹量。

2.2 生态补偿额度

基于生态系统服务价值法和替代成本法，本研究对长江流域 80 家样本企业的年生态补偿额度进行了测算，结果见表 1。基于生态系统服务价值法，各行业年生态补偿理论额度分别为造纸及纸制品业 12.89 亿元，纺织业 6.22 亿元，钢铁行业 84.20 亿元，农副食品加工及制造业 20.90 亿元，酒、饮料和精制茶制造业 9.88 亿元，80 家上市企业年生态补偿总额为 134.09 亿元。

基于替代成本法，对典型补偿项目成本进行测算。其中，蓝水足迹补偿以农业节水灌溉项目（建设滴灌 + 水肥一体化设备，减少灌溉用水）为例，单位成本按 5.5 元 /m^3 计算；灰水足迹补偿以人工湿地（净化污水，补充水量）项目为例，单位成本按 2 元 /m^3 计算。各行业年生态补偿理论额度分别为造纸及纸制品业 6.58 亿元，纺织业 2.60 亿元，钢铁行业 20.00 亿元，农副食品加工及制造业 9.59 亿元，酒、饮料和精制茶制造业 3.68 亿元，80 家上市企业年生态补偿总额为 42.45 亿元。

为增强补偿方案的可操作性，本研究引入企业支付能力作为约束条件，暂以企业营业收入的 1% 作为其支付能力上限进行调整（补偿额度超出营业收入 1% 的，按照 1% 进行补偿），最终得到各行业生态补偿额度合理区间。调整前后，补偿额度总额区间从 42.45 亿～134.09 亿元收窄至 41.09 亿～106.64 亿元，说明调整前部分企业补偿额超过其支付能力，且各行业呈现显著差异。其中钢铁行业补偿额度上限从 84.20 亿元

表 1 生态补偿资金额度测算结果 单位：亿元

测算方法	造纸及纸制品业（14 家）	纺织业（16 家）	钢铁行业（12 家）	农副食品加工及制造业（23 家）	酒、饮料和精制茶制造业（15 家）	合计
生态系统服务价值法	12.89	6.22	84.20	20.90	9.88	134.09
替代成本法	6.58	2.60	20.00	9.59	3.68	42.45
补偿额度区间（根据企业支付能力调整后）	5.42 ～ 6.22	2.60 ～ 3.84	20.00 ～ 68.90	9.59 ～ 19.67	3.48 ～ 8.01	41.09 ～ 106.64

降至 68.90 亿元，但仍远高于其他行业，这与其高耗水、高污染的产业特性相符，充分体现了“污染者付费”原则，但对部分企业来说可能会带来经营压力；农副食品加工及制造业，酒、饮料和精制茶制造业等行业在调整前后补偿额度变化不大，表明其现有利润空间足以覆盖补偿成本；造纸及纸制品业补偿额度区间从 6.58 亿～12.89 亿元降至 5.42 亿～6.22 亿元，表明很多企业盈利能力有限，难以承担全部补偿成本。这一结果表明，企业生态补偿标准制定需充分考虑不同企业经营状况等因素，实施差异化补偿政策，避免“一刀切”带来的经营压力。

进一步从企业微观层面分析补偿机制的财务影响，如图 2 所示，补偿额度上限占营业收入比例达到 1% 的企业共 22 家，主要分布于造纸及纸制品业、钢铁行业和纺织业；其余 58 家企业该比例低于 1%，其中 37 家该比例低于 0.5%。补偿额度下限占比达到 1% 的企业仅 5 家，且多为造纸企业。这表明对大多数企业而言，水足迹补偿机制带来的成本处于可承受范围内。然而，对于部分触及支付能力上限的企业，在政策设计时应予以重点关注，可通过配套激励措施缓解成本压力，保障机制的公平性与可持续性。

最终，80 家样本企业年生态补偿理论额度区间为 41.09 亿～106.64 亿元，二者之间存在约 65.55 亿元的价值缺口，表明单纯依靠工程治理成本（下限）难以完全弥补水资源开发利用造成的生态价值损失（上限）。这一缺口的本质是水资源生态服务功能中的非使用价值难以通过工程措施完全替代和补偿，凸显了生态保护与经济发展之间的深层次矛盾，同时也为探索生态价值的市场化实现与多元化生态补偿机制提供了依据。

需要说明的是，本研究仅给出补偿标准核算方法和示例说明，在实际应用中补偿标准的确定非常复杂，应结合其他因素，并根据各方意见进行磋商确定。

2.3 市场化生态补偿运行模式

本研究借鉴国际上企业参与市场化水生态补偿的典型实践——水基金模式，该模式主要由公益性环保组织发起，其核心运作机制是依托信托基金归集企业自愿捐赠的资金，并将这些资金专项用于水源地保护与流域治理项目。例如，厄瓜多尔基多水信托基金 [30] 和中国浙江千岛湖水基金 [31] 等案例，这些水基金通过灵活的参与机制有效调动了政府、企业、社区等多元主体的积极性。然而，这类由社会组织主导的模式存在一定局限性。首先，发起机构需分别与众多政府机构和企业进行一对一的沟通对接，导致交易成本高昂；其次，这种分散化的协调方式限制了可实施的水源保护项目的规模和范

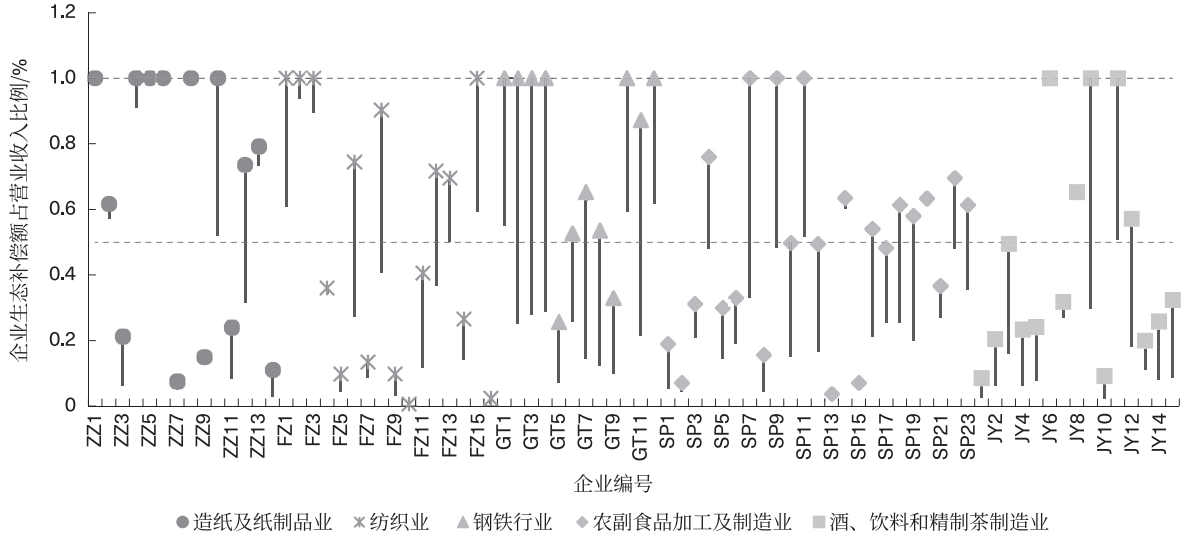

图 2　80 家企业生态补偿额占营业收入比重分布

注：横轴为不同行业企业编号，其中 ZZ、FZ、GT、SP、JY 分别代表造纸及纸制品业、纺织业、钢铁行业、农副食品加工及制造业，以及酒、饮料和精制茶制造业；纵轴为以 1% 营业收入作为上限调整后的补偿金额占营业收入的比例；垂直线段表示补偿额度上下限区间；两条虚线分别为生态补偿占营业收入 0.5% 和 1% 的参考线。

围；此外，资金来源完全依赖企业自愿捐赠，难以形成稳定且足够规模的资金池。

为实现长江流域企业水足迹补偿资金的高效筹集与有效使用，在充分借鉴国际水基金模式实践经验及考虑其局限性的基础上，结合中国流域治理中政府主导的制度背景，本研究提出在长江流域建立水足迹补偿基金模式。该模式的核心在于：在政府引导与有力监管的框架下，通过构建一个专业化、平台化的基金运作体系，实现企业补偿资金的高效归集与统筹配置，并将其集中投入支持全流域水资源保护、治理与生态修复的项目。这一设计既保留了传统水基金模式对多元参与主体的吸引力，又依托政府的权威性和资源整合能力，有效突破了项目规模与资金稳定性的瓶颈，同时借助市场化交易机制提升了整体运行效率和资源分配的灵活性。

长江流域企业水足迹补偿基金可由长江流域省级政府联合发起，委托具有公信力的国家级或区域性公益基金会，设立长江流域水足迹补偿基金管理平台和基金管理委员会。基金管理委员会成员包括政府代表、出资企业、环保组织、行业专家、公众代表等，负责制定基金章程、项目筛选标准、资金使用规则等重大事项。国家相关部门应制定水足迹核算标准及补偿水量核算方法学。该模式有四类核心参与主体：补偿主体为需履行水足迹补偿责任的用水企业；受偿主体为具体实施水资源保护与治理项目的主体，包括地方政府、专业环保公司、非政府组织（Non-Governmental Organizations，NGO）、科研机构及社区组织等；监管机构为政府相关职能部门，负责对基金运作全过程进行监督管理；第三方机构则包括为补偿主体和受偿主体提供技术服务的咨询设计机构，以及对项目产生的补偿水量进行专业核证的机构。基金管理平台的核心功能是充当高效的中介枢纽，精准连接资金供给方（补偿主体）与项目执行方（受偿主体），促进资源的优化配置。

基金运行主要有四个核心环节（图 3）：①补偿资金归集与管理。由政府层面牵头划定优先参与水足迹补偿的企业清单，优先纳入钢铁、造纸、农副食品加工等高耗水、高污染行业的重点上市企业。可探索建立“基准额度 + 市场交易”的机制，即企业除依据其水足迹核算结果完成基准补偿额度外，还可通过基金平台购买额外水补偿权益或投资符合标准的补偿项目。同时，基金平台面向全流域企业开放自愿参与通道，鼓励企业以购买基金份额、定向投资或捐赠等方式参与，进一步拓宽资金来源。补偿额度的基准单价可依据水资源稀缺程度、行业特性、项目类型或区域差异等进行调整。所有归集的资金统一进入信托基金平台进行统筹管理。②补偿项目遴选与资金拨付。建立科学的项目筛选标准和评估体系，基金管理平台定期发布项目征集指南，遴选需要支持的项目（包括高效节水灌溉、安全饮用水供应、中水回用等补充或减少蓝水消耗的项目，以及湿地保护修复、污水净化工程、农业面源污染治理等净化灰水或补充水环境容量的项目）。专家委员会依据生态效益、成本效益、技术可行性、可持续性等标准对申报项目进行严格筛选和排序，确定资助项目库，并进行阶段性资金拨付。③补偿水量及成效评估与核证。项目实施后一定周期内，由第三方机构基于实际监测数据对项目实际产生的有效补偿水量及实施效果进行核证，并评估长期生态效果，出具核证报告。核证通过的结果将录入基金平台系统，并据此生成标准化的水补偿凭证，内容包括项目类型、补偿水量、水质及其他生态效果等。基金平台根据预设规则，结合企业的出资比例、取水源所在地、行业特性等因素进行凭证分配。例如，若企业 A 和企业 B 共同出资支持某项目，出资比例分别为 60% 和 40%，则它们分别获得该项目核证补偿水量的 60% 和 40% 对应

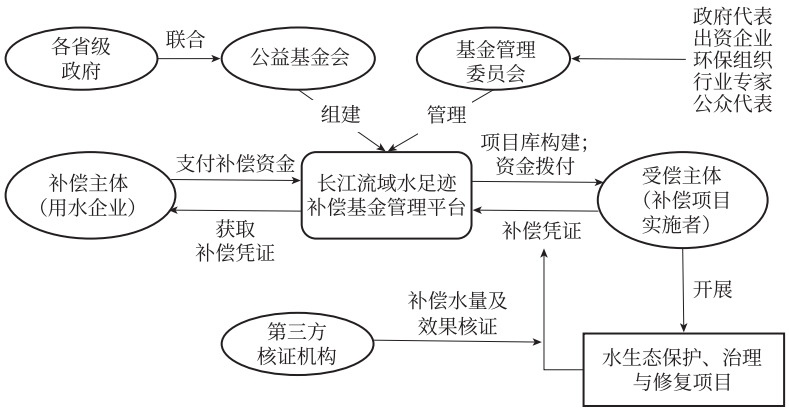

图 3　长江流域水足迹补偿基金运行模式

的凭证。未来可在政府监管下探索建立区域性水补偿权益交易平台，允许凭证在不同企业、区域间进行合规流转与抵销。④信息公开与监督。基金平台定期向社会公众、出资企业、政府部门等披露基金运作情况、资金收支明细、项目进展、核证结果及生态效益评估报告，接受社会广泛监督。政府相关部门负责对基金整体运作合规性进行监管审计。企业可在其 ESG 报告或可持续发展报告中设立专项，详细披露其水足迹补偿情况，包括实际完成的补偿水量、缴纳的补偿资金额度及所支持项目产生的具体生态环境效益等（例如，某钢铁企业披露其出资 ×× 万元，通过支持 ×× 项目实现向自然补偿水量 ×× 万吨，且该项目出水 COD 浓度降低了 ××%）。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究以长江流域造纸及纸制品业，纺织业，钢铁行业，农副食品加工及制造业，以及酒、饮料和精制茶制造业这五大高耗水、高污染行业的 80 家上市企业为研究对象，以企业水足迹为补偿依据，基于生态系统服务价值法（设定补偿额度上限）和替代成本法（设定补偿额度下限），并考虑企业支付能力，测算企业应承担的理论生态补偿额度区间，构建了以水足迹补偿基金为核心的市场化生态补偿运行模式，得出主要结论如下：

（1）长江流域五大行业 80 家样本企业年水足迹总量达 11.93 亿 m^3，且行业间差异显著。钢铁行业水足迹远超其他行业，且以蓝水足迹（直接水资源消耗）为主；造纸及纸制品业、纺织业、农副食品加工及制造业，以及酒、饮料和精制茶制造业等行业则多以灰水足迹（污染稀释所需水量）为主，这表明不同行业对水资源的影响路径不同。

（2）基于生态系统服务价值法（补偿额度上限）和替代成本法（补偿额度下限）测算并根据企业支付能力调整后，长江流域样本企业年生态补偿总额区间为 41.09 亿～106.64 亿元。对比以营业收入 1% 作为企业支付能力上限进行调整前后的数据发现，各行业承受能力呈现差异：钢铁行业虽经调整（补偿额度上限从 84.20 亿元降至 68.90 亿元）仍承担最高补偿额，农副食品加工及制造业，酒、饮料和精制茶制造业等行业利润空间可覆盖治理成本，而造纸行业部分企业则显现出盈利能力有限的问题。这表明“一刀切”的补偿标准不可行，必须实施差异化补偿策略。

（3）针对长江流域空间跨度大、利益协调复杂等特征构建“政府引导 + 市场化运作”的水足迹补偿基金模式，有效整合零散资金，通过专业化、透明化的平台运作，支持流域节水增容和环境治理项目，为该流域探索市场化、多元化生态补偿提供了可操作的实现路径，同时为我国其他水资源压力较大的工业集聚流域提供了重要参考与借鉴。

3.2 建议

企业通过水足迹补偿为水保护与治理付费，本质上是一种将生态负外部性内部化的市场化、激励性生态补偿机制。在我国现有的强制性节水治污措施体系基础上，通过实施此种激励性机制，一方面能有效拓宽生态保护融资渠道，缓解传统财政补偿的压力；另一方面能助推企业完善水资源风险管理与可持续信息披露体系，从而提升产品绿色属性，提高企业在国际市场上的竞争力。本研究通过企业水足迹核算、生态补偿标准测算及实施路径设计，为在长江流域率先构建此类市场化生态补偿机制提供了初步的理论基础和实践框架。为推进该机制从理论走向实践，本研究提出以下建议：

（1）研究制定长江流域企业水足迹补偿管理办法。以《生态保护补偿条例》为依据，将企业水足迹补偿机制作为一种激励性生态补偿创新机制，由国家发展改革委、水利部、生态环境部等相关部门会同长江流域省级政府研究并制定长江流域企业水足迹补偿管理办法，明确优先将钢铁、造纸等高耗水、高污染行业企业纳入补偿主体范围，制定统一的水足迹核算方法、补偿资金核算与缴纳流程、补偿项目筛选与补偿资金使用规则等，并建立跨省域监管协同与争议协调机制，为机制运行提供法律与政策保障。

（2）建立符合长江流域特点的水足迹核算与补偿标准体系。在长江流域先行试点，参考国内外已有的水足迹核算方法，制定长江流域企业水足迹核算技术规范；建立体现区间弹性与行业差异的基准

补偿标准测算方法，并根据企业规模、盈利能力、支付意愿，以及所在区域水资源禀赋、生态功能定位等因素对其进行动态调整。

（3）搭建长江流域水足迹补偿基金平台。建议由长江流域内省级政府、金融机构、代表企业等共同发起，试点组建长江流域水足迹补偿基金，委托专业机构进行市场化运作。结合长江流域上、中、下游差异化生态需求，上游侧重水源涵养，中、下游侧重污染治理与生态修复，建立严格的资助项目遴选、资金拨付、成效核证与信息公开制度，确保补偿资金精准使用，并形成显著的生态效益。

（4）建立长江流域水足迹补偿多元化激励机制。一是完善企业涉水信息披露制度，建立强制与自愿相结合的披露机制。可率先要求长江流域重点行业上市企业披露年度水足迹量、水足迹风险及位置、补偿资金缴纳及补偿项目类型、补偿水量及产生的其他效益等信息；鼓励非上市企业自愿披露。二是完善财税激励机制，对积极履行生态补偿责任的企业，给予所得税优惠、财政补贴、绿色信贷优先支持等政策。三是强化约束机制，探索将企业水足迹管理及补偿履行情况纳入企业环境信用评价体系，与排污许可、项目审批等挂钩。

待上述机制在长江流域运行成熟并取得显著成效后，建议由国家相关部门牵头，系统总结其制度设计、核算标准、平台运营及配套政策的核心经验，凝练成可复制、可推广的长江流域企业水足迹补偿模式。在此基础上，研究制定适用于全国重点流域的指导性文件，将水足迹补偿的核心理念、差异化标准框架及市场化平台运作模式，向黄河、珠江、淮河等生态重要且同样面临水资源压力的流域进行适应性推广。

参考文献

[1] 许继军，刘建峰．新时期长江流域生态补偿机制与关键科学问题研究 [J]. 人民长江，2024, 55(6): 16-21.

[2] 赵晶晶，葛颜祥，李颖．流域生态补偿多元融资的障碍因素、国际经验及体系建构 [J]. 中国环境管理，2022, 14(2): 62-69.

[3] 赵晶晶．流域生态补偿多主体协同机制研究 [D]. 泰安：山东农业大学，2023.

[4] 周业晶，周敬宣，夏梦，等．生态系统调节服务价值的熵增曲面模型横向补偿方法研究 [J]. 中国环境管理，2024, 16(3): 56-65.

[5] 张捷，谌莹，石柳．基于生态元核算的长江流域横向生态补偿机制及实施方案研究 [J]. 中国环境管理，2020, 12(6): 110-119.

[6] SUN H, GAO G K, LI Z H. Research on the cooperative mechanism of government and enterprise for basin ecological compensation based on differential game[J]. PLoS One, 2021, 16(7): e0254411.

[7] WEI C, LUO C C. A differential game design of watershed pollution management under ecological compensation criterion[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122320.

[8] 郝春旭，赵艺柯，何玥，等．基于利益相关者的赤水河流域市场化生态补偿机制设计 [J]. 生态经济，2019, 35(2): 168-173.

[9] 曾贤刚，刘纪新，段存儒，等．基于生态系统服务的市场化生态补偿机制研究——以五马河流域为例 [J]. 中国环境科学，2018, 38(12): 4755-4763.

[10] 孙艳芝，唐泽，王志凯，等．基于生态系统服务的横向生态补偿研究——以赤水河流域为例 [J]. 自然资源学报，2025, 40(3): 786-796.

[11] 吴蕾，官冬杰，姜亚楠，等．基于灰水足迹的长江流域生态补偿额度量化及应用 [J]. 重庆师范大学学报（自然科学版），2024, 41(1): 51-64.

[12] 袁广达，吴剑．太湖流域工业企业生态环境成本补偿标准设计——来自 2004—2010 年苏沪边界面板数据的证据 [J]. 生态经济，2014, 30(6): 166-170.

[13] 宋佳，郝珍珍，马俊勇．基于生态系统服务价值的水电开发生态补偿研究——以玛尔挡水电站为例 [J]. 人民长江，2024, 55(12): 118-123, 130-130.

[14] 康瑞．考虑区域差异化的水价改革研究 [D]. 大连：大连理工大学，2024.

[15] 钟玉秀，杨柠，崔丽霞，等．合理的水价形成机制初探 [J]. 水利发展研究，2001(2): 13-16.

[16] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade[R]. Value of Water Research Report Series No. 11, Delft: UNESCO-IHE, 2002.

[17] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. Washington: Earth Scan Publications, 2011: 8-9.

[18] 董战峰．加快建立健全 ESG 体系，助推企业提升现代绿色治理水平 [J]. 中国环境管理，2024, 16(1): 5-6.

[19] 刘轶芳，李霞，郑依依，等．我国企业 ESG 表现对其经济效益的影响研究——基于沪深上市企业 [J]. 中国环境管理，2024, 16(1): 34-41, 26.

[20] 邓明君，巩希锋，罗文兵．基于价值创造视角的公司水风险管理研究 [J]. 中国环境管理，2022, 14(1): 93-100.

[21] 刘红光，陈敏，唐志鹏．基于灰水足迹的长江经济带水资源生态补偿标准研究 [J]. 长江流域资源与环境，2019, 28(11): 2553-2563.

[22] 张临．环境公平视角下长江经济带灰水足迹转移的生态补偿

方案研究 [D]. 杭州 : 浙江财经大学 , 2024.
[23] 孙清清 , 黄心禺 , 石磊 . 纺织印染企业水足迹测算案例 [J]. 环境科学研究 , 2014, 27(8): 910-914.
[24] 吴兆丹 , 杨耀辉 , 吴竹雅 . 白酒企业水足迹核算框架分析——以酱香型白酒为例 [J]. 给水排水 , 2023, 59(10): 59-67.
[25] 程鹏 , 孙明东 , 宋晓伟 . 中国灰水足迹时空动态演进及驱动因素研究 [J]. 生态环境学报 , 2024, 33(5): 745-756.
[26] 冯浩源 . 中国灰水足迹时空演变及省际转移的环境影响研究 [D]. 上海 : 华东师范大学 , 2023.
[27] 王丹阳 , 李景保 , 叶亚亚 , 等 . 一种改进的灰水足迹计算方法 [J]. 自然资源学报 , 2015, 30(12): 2120-2130.
[28] 刘桂环 , 王夏晖 , 文一惠 , 等 . 近 20 年我国生态补偿研究进展与实践模式 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(5): 109-118.
[29] 郑阳 , 于福亮 , 桑学锋 , 等 . 长江流域水系统生态服务价值评价方法 [J]. 中国水利水电科学研究院学报 (中英文), 2023, 21(3): 222-235.
[30] KAUFFMAN C M. Financing watershed conservation: Lessons from Ecuador's evolving water trust funds[J]. Agricultural Water Management, 2014, 145: 39-49.
[31] 靳彤 , 穆泉 , 王龙柱 , 等 . 基于自然的解决方案 : 应对水资源危机中国实践——浙江千岛湖水源地保护案例 [J]. 自然保护地 , 2021, 1(4): 10-19.

Research on the Market-Oriented Ecological Protection Compensation Mechanism in the Yangtze River Basin Based on Water Footprint

XIE Xiangxiang[1,2], LI Chong[1,2*], YANG Pei[1,2], CAO Yan[1,2], LI Wei[1,2], SUN Kaili[1,2], HUANG Zhidong[1]
(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 2. National Engineering Research Center for Eco-Environment of Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014, China)

Abstract: To address the long-standing challenges of excessive fiscal dependence and insufficient sustainability in ecological compensation within the Yangtze River Basin, this study proposes and develops a market-based ecological protection compensation mechanism rooted in corporate water footprints. Focusing on 80 listed companies from five water-intensive and high-polluting industries in the basin, the research employs water footprint theory to quantify their water resource consumption and pollution loads. By integrating the ecosystem service value method (setting the upper bound for compensation) and the alternative cost method (setting the lower bound), and further adjusting by corporate payment capacity constraints, a differentiated ecological compensation amount range is scientifically determined. The results indicate that: ① The total annual water footprint of sample companies reaches 1.193 billion m^3, with notable variation across sectors: the steel industry's footprint is highest dominated by blue water footprint, whereas other industries like paper and textiles are primarily characterized by grey water footprint. ② The total estimated compensation amount ranges from 4.109 billion to 10.664 billion yuan. The value gap of approximately 6.555 billion yuan reveals that engineering remediation costs cannot fully cover the loss of ecosystem service values. ③ Comparing the data before and after adjusting for payment ability, it is found that the steel industry remains responsible for the highest compensation, agricultural and sideline food processing, as well as the beverage and refined tea manufacturing industries demonstrate relatively better financial resilience, while some paper manufacturers face financial constraints, underscoring the necessity for differentiated compensation policies. Consequently, the study proposes a "Water Footprint Compensation Fund" as a core market instrument, operating under a model of "government guidance, corporate contribution, and platform management". This study provides a theoretical and practical foundation for promoting a corporate-led, market-driven ecological protection compensation mechanism in the Yangtze River Basin.

Keywords: water footprint; market-oriented ecological protection compensation; ecosystem service value method; alternative cost method; water footprint compensation fund; Yangtze River Basin