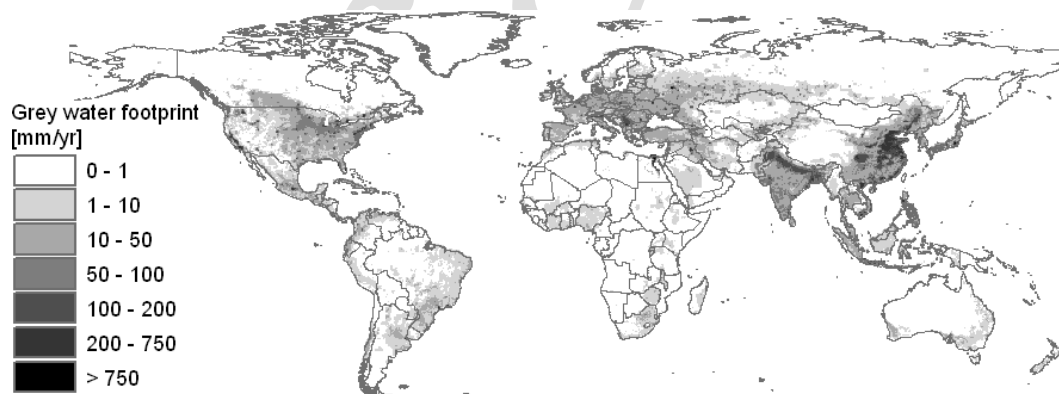


认识企业的水足迹

工业企业水足迹案例研究

程水杰 阮清鸳 马军

2012-7-4



此次研究以联合利华一家在华工厂作为样本，着重计算了企业自身的运行水足迹，探讨了在中国的水环境和水污染治理条件下，工业企业灰水足迹计算的若干问题。



致谢

- 本研究是基于总部设在荷兰的水足迹网络 (Water Footprint Network) 提出的水足迹全球水足迹标准开展的¹。
- 联合利华(中国)有限公司及其样本工厂的 EHS 部门提供了大量的检测数据，使本研究的完成成为可能。
- 感谢北京林业大学自然保护学院刘俊国教授在方法论上的悉心指导。
- 感谢水足迹网络的张国平博士在方法论上给予建设性意见。
- 感谢研究过程中给予支持的各方机构和专家。

¹ 水足迹标准及评估手册见水足迹网络网站 <http://www.waterfootprint.org/>
封面题图为全球灰水足迹图，引用自水足迹网络 http://www.waterfootprint.org/downloads/WF_grey_large.jpg

目录

摘要	4
1、介绍	5
2、样本	7
3、计算方法及结果.....	8
3.1 水足迹组成介绍	8
3.1.1 生产性运行水足迹 ($WF_{oper,inputs}$)	8
3.1.2 保证性运行水足迹 ($WF_{oper,overhead}$)	9
3.2 计算流程	9
3.2.1 绿水足迹.....	9
3.2.2 蓝水足迹计算方法.....	10
3.2.3 灰水足迹计算方法.....	10
3.2.4 工业企业灰水足迹计算的难点探讨.....	12
4、计算结果及其说明.....	19
4.1 计算结果	19
4.2 计算结果说明	19
4.2.1 灰水足迹在企业的运行性水足迹中可能占有较大比重.....	20
4.2.2 改进治污措施大幅度降低灰水足迹.....	20
4.2.3 不应忽略保证性水足迹.....	22
4.2.4 从绿色供应链角度考虑减少水足迹.....	23
5. 发现及建议	25
5.1 针对企业的发现和建议.....	25
5.2. 水足迹计算方法的发现及结论.....	25

摘要

淡水是世界上一种可以再生但是有限的自然资源。工业化以来，持续增长的世界人口伴随着社会经济的发展给本来就有限的水资源带来了空前的压力。为了表征人类直接或间接对水资源的使用或者消耗，2002年荷兰 Twente 大学的 Hoekstra 等提出了水足迹概念，2009年开发了水足迹评价指南，用以计算和评价水足迹建立了一个标准。根据这一理论，水足迹包括绿水足迹(green water footprint)、蓝水足迹(blue water footprint)和灰水足迹(grey water footprint)。

绿水足迹和蓝水足迹相对容易理解，其计算方法在过去八年间已经相对成熟，并且开始为世界食品行业的 Coca Cola、世界上最大的啤酒商 SABMiller 等大型企业所应用。然而，灰水足迹则不是那么直截了当。其中农业灰水足迹的方法论初步成型，并已经有所应用（Coca Cola 与 WWF）。但工业企业的灰水足迹的方法论则尚待完善，其实际应用则更少。

而随着中国、印度等人口大国进入工业化和城市化的高速发展期，水污染问题日益凸显，它不但威胁了民众的健康，危害了社会稳定，而且进一步破坏了有限的淡水资源。而工业企业的污水排放是造成水污染的重要原因。因此工业企业灰水足迹的计算，对发展中国家就有特殊的重要意义。

有鉴于此，公众环境研究中心与联合利华合作，共同开展了对于工业企业灰水足迹的研究。此次研究是以联合利华在华的一家工厂作为样本进行的。企业水足迹由企业运行（直接）水足迹和供应链（间接）水足迹两部分组成。本次我们着重计算了企业自身的运行水足迹。

此次研究表明，工业企业的水足迹计算方法，特别是灰水足迹计算在中国的运用，还存在若干需要探讨和明确的问题值。例如，企业排污纳管排放后，其灰水足迹如何计算。但总体看来，运用水足迹方法计算某个企业的水足迹，是可行的。

通过研究我们看到，工业企业污染排放可能带来巨大的水足迹，而如果能够做好治污和节水，其改进的潜力也是巨大的。由此我们认为，对水足迹进行核算，不但对中国企业，而且对其它地区的企业认识自身的环境对水资源造成的影响，进而采取措施减轻影响，都有价值。

1、介绍

水资源是人类社会以及整个生态系统存在和发展的先决条件 (Costanza and Daly, 2002)。当今, 人类使用的淡水资源的 70% 用于农业灌溉 (Gleick, 1993; Bruinsma, 2003; Shiklomanov and Rodda, 2003; UNESCO, 2006)。市政和城市居民同样也是重要的用水方。同时, 不但人类离不开水资源, 自然生态系统同样需要水资源维系自身的正常运转。而水资源同样是工业发展的一个基本要素。

包括中国在内的发展中国家的大规模工业化进程, 意味着工业用水将与农业用水、市政和城市居民用水、以及生态用水展开竞争。从目前来看, 工业用水在与农业和生态用水的竞争中占据优势。在以市场化方式分配自然资源的原则指导下, 工业企业可以通过支付更高水价获取更多资源。

然而, 随着全球人口于 2011 年达到了 70 亿, 为保障全球粮食安全而确保农业用水将被提升到涉及全球安全的高度。在工业化进程的同时, 城市化进程也在发展中国家大规模展开, 城市居民用水量增加。同时, 一些地区在过去数十年中对地下水源和河流的过度开发已经到了难以为继的程度, 为避免这些地区陷入严重的生态退化, 我们必须考虑偿还水资源赤字。

水资源也是企业生产经营过程中的一个基本要素。面对全球水资源供给日益趋于紧张的背景, 有学者认为, 企业将会在以下四方面面临水资源风险:

- 企业逐渐面临本企业或其供应链企业的淡水资源短缺的直接风险;
- 企业能否正确解决水资源使用的可持续性问题出现在公众视野中时的企业信誉风险;
- 政府层面的监管风险;
- 以上风险所引发的企业成本增加或收入下降的金融风险²

负责任的企业有必要制定水资源战略, 以避免风险, 实现永续经营和发展。要应对风险的第一步应当是认识风险, 而清晰地认识一个企业直接或者间接运行中所使用的淡水量是风险计算的重要基础。

为了表征人类对于水资源的直接和间接消耗程度, 荷兰 Twente 大学的 Hoekstra 等学者提出了水足迹概念。企业水足迹指企业生产产品或者提供服务所使用的淡水量 (Hoekstra and Chapagain, 2008), 或者说企业水足迹等于直接或者间接运行和维持一个企业所使用的淡水量。水使用量的计算以单位时间消耗 (蒸发或者进入产品) 和污染的淡水量来计算。

Hoekstra 等学者提出, 水足迹包括绿水、蓝水和灰水足迹。其中

- 绿水足迹指消耗的保存在土壤中的雨水资源量;
- 蓝水足迹指的是生产产品和服务所消耗的地下水和地表水资源量;
- 灰水足迹指生产过程造成的受污染的水资源量, 或为使水质达到排放标准, 稀释污染物所需的水量。

绿水足迹和蓝水足迹相对容易理解, 其计算方法在过去几年间已经相对成熟, 并且开始为国际上许多大型企业所应用。然而, 灰水足迹则不是那么直截了当。其中农业灰水足迹的方法论初步成型, 并已经有所应用 (Coca Cola 与 WWF)。但工业企业的灰水足迹的方法论则尚待完善, 其实际应用则更少。

分析灰水足迹研究和应用的空缺, 原因之一是多数发达国家和地区经过数十年的治理, 水污染状况相对稳定, 其工业企业的排放量总体下降, 污染物排放总体上能够符合排放浓度和总量的标准;

² Rondinelli and Berry, 2000; WWF, 2007

而与此同时，其河流、湖泊、湿地等拥有相当的环境容量，能够有效稀释、净化工业企业排放的污染物。因此，企业在水足迹计算中更多关注的显示水量消耗的蓝水和绿水足迹，而水污染形成的灰水足迹则较少考虑。

而随着中国、印度等人口大国进入工业化和城市化的高速发展期，水污染问题日益凸显。2007年中国环保部门的负责人曾就中国当前面临的水环境形势向全国人大作出了如下介绍³：

- “流经城市的河段普遍受到污染，一些地区已经出现了‘有河皆干、有水皆污’的现象。”
- “全国大、中城市浅层地下水不同程度地遭受污染，约一半的城市市区地下水污染较为严重。”
- “全国有 3 亿多农村人口存在饮用水不安全问题。”
- “主要水污染物排放总量明显超过环境容量，群众对水污染事件的投诉越来越多。”

而水污染物的实际排放量甚至更大。以评定水污染程度的重要综合指标化学需氧量(COD)为例，2007 年度《中国环境状况公报》公布的总排放量为 1381.8 万吨，而根据 2010 年首次披露的全国污染源普查数据，全国 COD 排放量为 3028.96 万吨，超过以往统计数据一倍以上。

自然生态系统能够通过自我调节吸纳一定的污染物，这就是所谓环境容量。依据环境规划部门的研究，全国地表水 COD 的环境容量为 740 万吨。按照原先公布的 COD 排放量，如果将 2007 年的水污染物排放量减半，就能降低到环境容量之下。而此番《普查公报》显示 2007 年实际排放的 COD 是环境容量的四倍以上，以“十一五”规划确定的五年实现 COD 减排 10%的速度，要真正还清中国的江河，还需付出加倍努力。

在这样的条件下，在华生产的工业企业必须认识到，从总体上来看，中国污染排放已超过水环境容量，因此在工业企业的废水排放一般都会对水体产生不利影响，如果不能有效控制，甚至会威胁民众健康，进一步加剧水资源短缺，甚至危害社会稳定。

显然，企业的水污染排放，对于在中国等发展中国家的生产和采购的企业来说，会带来更大的风险。而通过对工业企业灰水足迹的计算，可以对水污染物排放产生的风险有一个量化的认识。而正确识别风险，是控制风险的重要前提条件。

基于这一认识，公众环境研究中心与联合利华合作，以一个典型的日化用品企业作为蓝本，共同开展了对于工业企业灰水足迹的研究。期望通过对水足迹方法论一个实际检验运用，推动完善适用于工业企业水足迹计算的方法。

³ 展望 2007 年：水污染防治仍是重中之重，新华网，2007 年 01 月 07 日

2、样本

此次研究是以联合利华在华的一家工厂作为样本进行的。企业水足迹由企业运行（直接）水足迹和供应链（间接）水足迹两部分组成。本次我们只计算了企业运行水足迹。

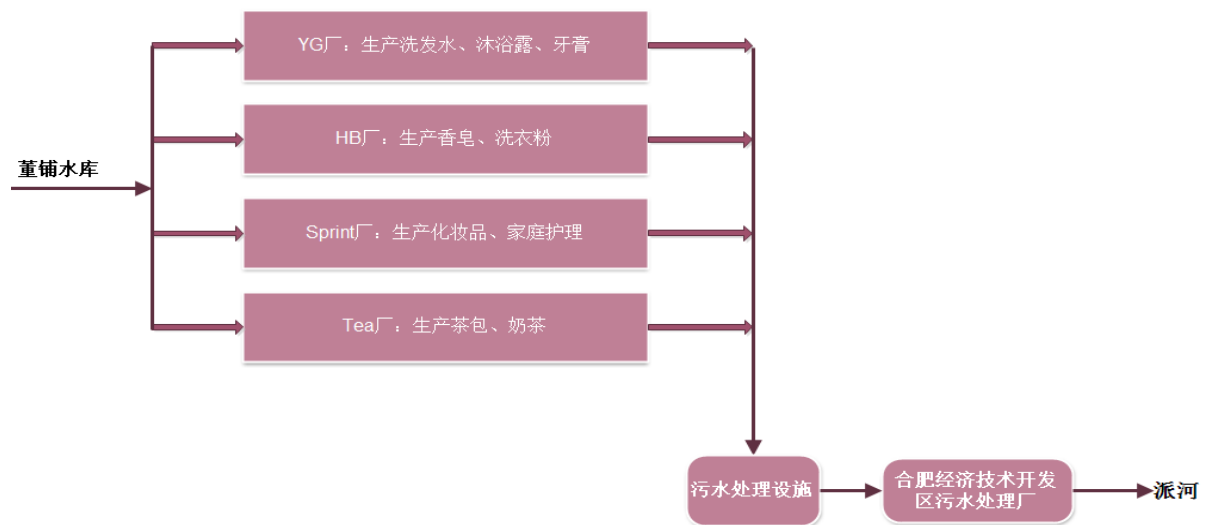
该企业是一家日化产品为主的企业。日化产品已成为人们生活中的必需品，产品生产和消费量较大，而伴随生产和消费都会消耗相当的水资源，因此了解日化企业对于水资源的利用具有十分重要的意义。

该日化企业按照产品线不同分为四个独立的分厂：**YG 厂**-生产洗发水、牙膏；**HB 厂**-生产洗衣粉、香皂；**Sprint 厂**-化妆品和家庭护理产品；**Tea 厂**-生产茶包和奶茶。

各个分厂有独立的进水排水系统，生活用水与生产用水独立排放。四个分厂之间没有物流发生。四个分厂排放的污水统一先排入总厂污水处理厂然后经处理后排入开发区污水厂，最后再经处理后排入当地区域的一条河流。

本次计算的边界分别以取水点董铺水库为计算起点，以市政污水处理厂排入当地河流为计算的结束边界。

图表 1. 企业单元组成

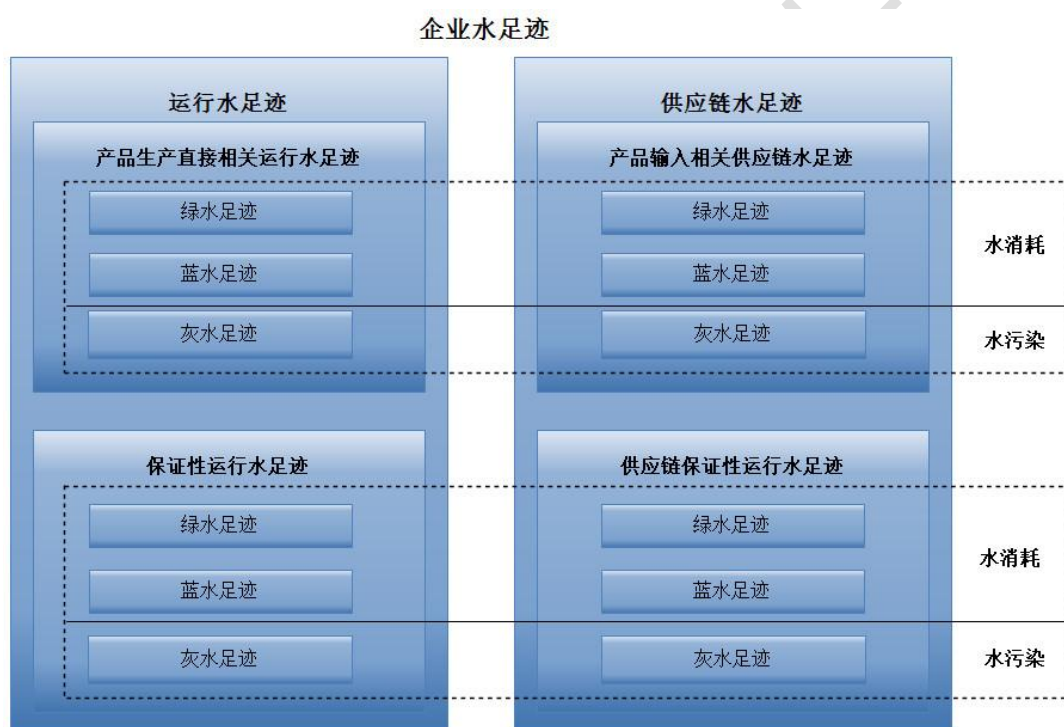


3、计算方法及结果

3.1 水足迹组成介绍

企业水足迹由企业运行（直接）水足迹和供应链（间接）水足迹两部分组成，如图 1 所示。本次我们只计算企业的运行水足迹。企业运行水足迹分为：生产性运行水足迹和保证性水足迹。前者指的是与产品生产直接相关的水足迹，如：产品成分水，生产管道冲洗废水等。后者指为维持企业的正常持续生产而发生的水足迹，如：饮用，洗衣，洗浴，冲厕，绿植养护，厂区清洁等后勤保证性生活用水。

图表 2、 企业水足迹组成



3.1.1 生产性运行水足迹 ($WF_{oper,inputs}$)

生产性运行水足迹 ($WF_{oper,inputs}$) 的来源包括以下三方面

- 作为成分进入产品的水；
- 生产过程中的消耗水；
- 生产过程中污染的水。

前两部分形成了运行性蓝水足迹，第三部分形成运行性灰水足迹。由于本文计算的企业厂区内没有任何雨水收集利用设施，而且企业运行中基本不消耗任何绿水（雨水），因此假定不会产生绿水足迹，本次计算中认为所有的绿水足迹为零。企业生产过程包括：膏体制作，压缩，混合，封装，贴标签，打包。在以上过程中，水的输送使用均发生在封闭的管道中，因此也可以认为不产生水损失。

各分厂（企业单元）生产过程（工艺切换中管路冲洗）产生的污水统一排入总厂区污水处理厂，经过处理后排入市政污水处理厂。虽然市政污水处理厂可以达标排放，但因为污染物的排放消耗

了派河的净化容量，所以仍然产生了灰水足迹。所以本文研究企业的生产性运行水足迹就是生产过程中蓝水足迹和灰水足迹的累加。

3.1.2 保证性运行水足迹 ($WF_{oper,overhead}$)

由于以下活动产生的水消耗或者水污染生成了保证性运行水足迹 ($WF_{oper,overhead}$)。

- 企业员工的水消耗（饮用）；
- 厕所厨房使用所引起的水消耗或者水污染；
- 员工洗衣产生的水污染或者水消耗；
- 工厂内清洁活动产生的水污染或者水消耗；
- 绿地养护产生的水消耗。

本次计算中，假设所有员工的饮用水和各厂区的绿地养护消耗的水量相对整个企业的水消耗或者水污染的水量来说很小，计算中该部分水足迹忽略不计。由于本文调研企业，各厂区生活污水由总厂统一管理，所以各分厂生活污水产生的灰水足迹部分按照各分厂员工人数分摊到各分厂进行计算。

3.2 计算流程

本文所有涉及的水足迹概念和计算方法遵循水足迹评价手册（2011版），但其中**纳入污水处理厂排放的水足迹计算方式，在手册中未能找到明确的计算方法，我们尝试以自己的方式进行了计算。**

绿水足迹指的是企业运行中生产产品和服务消耗的绿水资源（雨水）。蓝水足迹指生产产品和服务过程消耗的蓝水资源（地表水和地下水）。灰水足迹指企业生产产品和服务过程中污染的水资源量。

此次水足迹计算只计算企业运行水足迹，而不涉及供应链水足迹。

本次企业运行水足迹计算的程序如下。

- 了解调研工厂取水点，排水点所处环境状况，及水环境功能区划；
- 确认该企业的生产线区分，获取各分厂以及整个企业的用水及排水状况，计算调研企业蓝水足迹；
- 获取 2007-2010 年企业的排水水质，假设该部分废水不排入市政污水处理厂，而是排入天然水体，计算可能造成的灰水足迹，以下简称 WF_{grey1} ；
- 获取 2007-2010 年调研企业废水经由市政污水处理厂处理后废水水质信息，计算该废水排入派河的灰水足迹值，以下简称 WF_{grey2} ；
- 结合上述两个步骤，计算调研企业运行灰水足迹。

3.2.1 绿水足迹

绿水足迹指的是对企业生产产品或服务过程中对雨水资源的消耗量。本次研究企业，基本未对雨水资源进行任何形式的消耗利用，故计算中假定绿水足迹为零。

3.2.2 蓝水足迹计算方法

蓝水足迹 (WF_{blue}) 的是企业生产过程中消耗的地下水或地表水数量。

WF_{blue} = 蒸发水 + 产品成分水 + 回流损失水

本次研究中,调研企业生产过程中消耗的地表水和地下水是通过市政管道以自来水的形式进入企业,认为没有蒸发量和流失量的损失,此外由于存在自来水经工厂回流到原取水处的情况,所以企业的年度蓝水足迹在数量上等于企业年度消耗的淡水资源量减去企业的排污量得到的差值。各分厂单元分别以各自消耗的自来水资源量减去其排污量作为其蓝水足迹。本次计算中,企业运行蓝水足迹即 WF_{blue} = 企业年度用鲜水量 - 企业年度排污量

3.2.3 灰水足迹计算方法⁴

计算公式及相关设定

本次研究企业的污水以集中排放的形式排放,污染物负荷可以通过测量污水排放量和污染物浓度来计算,企业灰水足迹计算方法符合点源污染灰水计算的条件。故采用水足迹评价手册(2011版)点源计算公式,计算 2007 至 2010 年度灰水足迹,选取各污染物年度对应灰水足迹最大值为年度灰水足迹值。公式如下:

$$WF_{proc, grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{Effl \times c_{effl} - Abstr \times c_{act}}{C_{max} - C_{nat}} \quad [\text{volume/time}]$$

Effl: 废水排放量

Ceffl: 废水排放浓度

Abstr: 取水量

Cact: 取水地水质浓度

Cmax: 水环境质量标准中对应污染物浓度

Cnat: 自然水体水质浓度

本次计算水足迹的调研企业,新鲜水为董铺水库水经自来水厂处理后的自来水,中间运输、以及自来水厂处理过程中的水资源损耗因无相关数据,本次计算忽略中间的损耗。取水量等于自来水用水量。

安徽省水源地水质状况通报显示,董铺水库取水点水质情况总体良好,保持在二类标准,鉴于本次水足迹调研中未能获取董铺水库具体的水质浓度信息,因此 Cact 取各评价污染物对应地表水二类水限值。

调研工厂废水经污水处理站初步处理后进入开发区污水管网,再排入合肥经济技术开发区污水处理厂。合肥经济技术开发区污水处理厂出水排入派河中段,最终汇入巢湖,董铺水库与派河同属于巢湖流域。鉴于董铺水库是合肥市饮用水源地,本次水足迹计算视为功能区划为 GB3838-2002《地表水环境质量标准》中的 II 类标准,另,相关资料显示派河功能区划为 GB3838-2002《地表水环境质量标准》中的 IV 类标准,对应指标浓度如图表 3 所示。Cmax 取值该取水边界中最优水质,

⁴本次研究分别计算了企业的虚拟运行水足迹,即假设企业产生的污水经过自身污水厂处理后直接排入周围水环境派河产生的水足迹,及实际运行水足迹,即企业污水经过市政污水处理厂后排入派河产生的水足迹。

II 类水。

此外，因未能获得派河在未受人类活动影响的原始状态的派河各污染物的原始浓度，故本次水足迹计算假定 $C_{nat}=0$ 。⁵

图表 3. 部分地表水环境质量标准基本项目标准限值 单位: mg/L

指标	BOD ₅	COD	NH ₃ -N	LAS	TP	石油类
II	3	15	0.5	0.2	0.025	0.05
IV	6	30	1.5	0.3	0.1	0.5

➤ 流域背景情况

本次水足迹调研工厂取水，及排水点均为巢湖流域。根据 2009 年中国环境质量报告，2009 年巢湖东半湖为 IV 类水质，西半湖为劣 V 类，全湖平均为 V 类，主要污染物指标及水质状况汇总如下：

图表 4. 2009 年巢湖护体主要污染指标及水质状况汇总

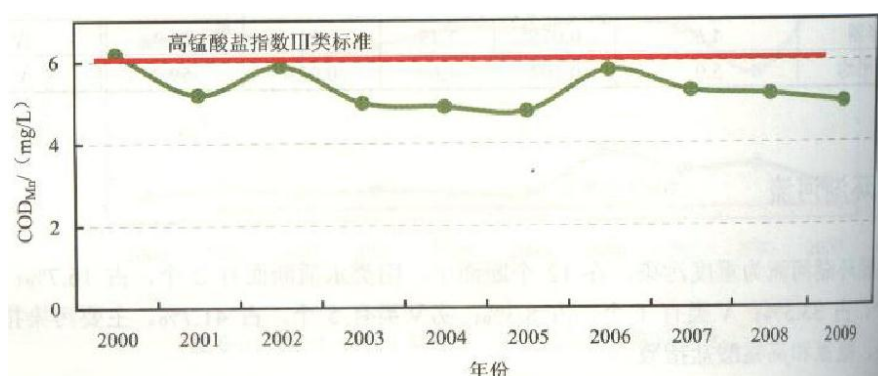
湖区	高锰酸盐指数 (mg/L)	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)	叶绿素 a (mg/L)	营养状态指数	水质类别
西半湖	5.4	0.129	2.19	0.034	62.6	劣 V
东半湖	4.6	0.075	1.19	0.011	54.3	IV
全湖平均	5.0	0.102	1.69	0.023	59.2	V

图表 5. 2000-2009 年巢湖总磷、总氮浓度年际变化



⁵这样的假定减少了水足迹的值。

图表 6. 2000-2009 年巢湖高锰酸盐指数浓度年际变化



在本次水足迹调研过程中，调研团队于 2011 年 5 月 13 日对派河入巢湖口上游 300 米处，及派河入巢湖入口处进行了采样检测，检测结果显示，上述两个采样点水样均为劣 V 类，检测结果如下：

图表 7. 调研水样检测数据

采样点	COD (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP
派河入巢湖口上游 300 米	104	6.75	1.47
派河入巢湖入口处	35.5	5.6	1.03

结论：巢湖流域的水体环境容量已经严重不足。

3.2.4 工业企业灰水足迹计算的难点探讨

➤ 企业纳管排放后，其灰水足迹如何计算

目前，国内大部分工业企业实现了污水纳管排放，在企业污水排入市政污水处理厂后经过处理达标排放（低于当地城镇污水排放标准中的污染物浓度限值）排入周围水体环境时，理论上应该认为这样的排放小于水环境容量，这样排污不产生灰水足迹。

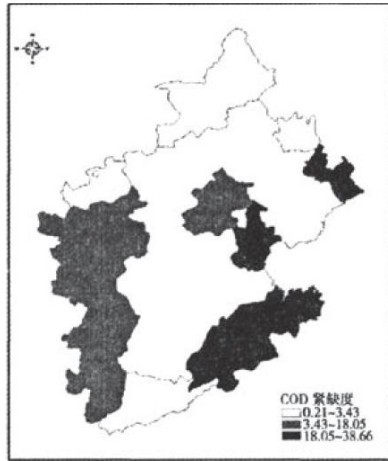
如前文所述，中国水污染物排放量远超环境容量，一些主要污染物排放量超过数倍之多。

以海河流域为例，根据《海河流域各地区水环境容量紧缺度分析》⁶，海河流域的天津、山东、辽宁等地水环境容量中的 COD 容量已枯竭且严重超载；天津的 NH₃-N 排放量是其容量的 9.4 倍，辽宁、北京、河北和山东分别为环境容量的 4.7、3.9、2.7 倍。如图表 8 所示，目前中国的环境容量非常紧缺。

图表 8. COD、氨氮紧缺度指数⁷分析图

⁶ 张东菊、刘百桥、田秉晖，海河流域各地区水环境容量紧缺度分析，河北师范大学学报自然科学版，2011,35(1).

⁷ 环境容量在一定的确的缺乏成都称为环境容量紧缺度指数。



COD 紧缺度指数分布



氨氮紧缺度指数分布

而与此同时，中国污水处理厂的处理标准却是在有环境容量对污染物进行有效稀释、净化的基础上的制定的。其排放浓度以地表水标准对照，仍属于劣 V 类水平，在环境容量有限甚至为 0 的条件下，污水处理厂未经深度处理的达标排放仍然会对水体质量造成严重影响。

更为严重的是，目前中国许多城镇污水处理厂并不能保证稳定达标排放。有关资料显示，2011 年第一季度尚有 607 座投入运行一年以上的城镇污水处理厂没有达到国家的有关要求，平均运行负荷率不足 60%，部分污水处理厂污染物削减效率偏低⁸，甚至不少污水处理厂存在超标排放、擅自停运等情况。

鉴于中国目前的紧缺的环境容量，及排污终端污水处理厂的污染处理能力不足及超标情况，在没有多余水环境容量稀释净化污水厂排水的流域，污水厂排放依然产生水足迹，故纳管企业的灰水足迹不能忽略，更不能等同于零排放。

➤ 污染指标的选取

根据调研企业提供的建设项目环境影响报告表等材料，此次调研企业在生产经营过程中产生的主要污染物包括 COD、BOD₅、LAS、SS、总磷等。调研企业提供的 2007—2010 年监测数据显示，在历次监测中，时常纳入监测的指标包括 COD、BOD₅、SS、pH、NH₃-N、LAS、总磷、石油类。鉴于地表水环境质量标准中对悬浮物 SS 没有浓度要求，而 I 类水至 V 类水中 pH 限值均为 6-9，而调研企业废水接纳水体派河主要污染物为氨氮，派河最终汇入的巢湖湖体主要污染指标除了氨氮还包括石油类，因此选择 COD、BOD₅、NH₃-N、LAS、总磷、石油类作为此次灰水足迹计算的指标。

➤ 灰水足迹值的选定

根据水足迹手册(2011 版)，当产生的污水中存在多种污染物时，应分别计算各污染物产生的水足迹，以水足迹最大者为最终的水足迹。但在实际计算中，由于企业纳管排放，而市政污水处理厂接收的污水来源众多，构成复杂，其处理后的排水，一些污染物的排放浓度甚至会高于纳管企业相应污染物排入的浓度。

本次研究认为，当企业水足迹对应的污染物浓度低于经过污水处理厂排放出的该污染物浓度时，应视作该污染物未能通过市政污水厂得到进一步处理，因此不应以污水厂排放浓度计算该项污染物灰水足迹值，而是应该以企业自身排放的浓度值计算该项污染物灰水足迹值。

⁸ 关于全国城镇污水处理设施 2011 年第一季度建设和运行情况的通报，中华人民共和国住房和城乡建设部，2011/05/09，http://smkl.net/zcfg/jswj/csjs/201107/t20110715_203781.htm

总之，我们认为对于纳入污水处理厂排放的企业，工业企业灰水足迹的计算应当根据水足迹手册的计算方法结合从工厂出来的废水中相关污染物负荷经污水处理厂处理后是否得到有效削减来综合判断。

► 研究样本中灰水足迹计算源数据选取

由于调研企业排入污水处理厂，我们分别计算其各废水直接排入天然水体可能造成的灰水足迹（以下简称为 WFgrey1），以及其废水经由市政污水处理厂排入派河的灰水足迹值（以下简称为 WFgrey2）；本报告中，各年度水足迹计算中涉及的每种污染物指标浓度均基于所能收集到的该年度监测数据报告中数次监测浓度数据的平均值。由于所收集的监测数据有限，因此各年度相同污染指标的浓度值来源于不同的样本数量，所以最终水足迹数值可能会与实际数据有所不同。此外，根

据灰水足迹计算公式 $WF_{grey1} = \frac{Q \times C}{C_{nat}}$ ，灰水足迹值为零表示排水中某污染物的污染负荷小于取水中由该污染物带入的污染负荷，即未对环境造成新的污染。

2007 年

2007 年，调研企业自备污水处理设施能力为 400 吨/天，仅能够满足部分生产废水处理要求（2007 年经由其自备污水处理设施处理的废水量为 95045 吨），剩余无法处理的工业废水外运至合肥城水污水处理厂处理，根据统计，2007 年外运废水量为 31841 吨；生活污水经化粪池预处理后在总排口与处理后的工业废水混合排入合肥经济技术开发区污水处理厂，2007 年生活污水排放量，无具体统计数据，估算为 90000 吨/年，总废水排放量为 216886 吨。

- 2007 年灰水足迹的计算过程中，WFgrey1⁹根据调研企业提供的一份监测指标包括 COD、氨氮、LAS、SS、TP、pH 的总排口废水监测报告，以及 2007 年 COD 在线监测数据进行平均汇总其污染物排放浓度进行计算。外运的 31841 吨废水，以及未纳入企业自备污水处理站处理的 90000 吨生活污水鉴于无具体监测数值，本次计算中，假定该部分废水均达到其总排放口的污染物排放浓度进行汇总计算。鉴于外运 31841 吨废水为未经任何处理的高浓度水，在上述假定条件下，实际低估了其 2007 年 WFgrey1 值，计算结果为 1202.58 万吨，对应污染物为总磷。

图表 9. 2007 年 WFgrey1 计算结果

污染物	水足迹（万吨）
总磷	1202.580
NH3-N	639.544
LAS	211.411
COD	174.540
石油类	0
BOD5	0

⁹ WFgrey1 系指假设废水不经过污水处理厂处理而排入天然水体，可能造成的灰水足迹。

- 本次水足迹计算过程中，因无法获得 2007 年城市污水处理厂、合肥经济技术开发区污水处理厂外排污水排放浓度，而合肥经济技术开发区污水处理厂当时尚处于试运行状态，因此，2007 年 WFgrey2 的计算，假设 2007 年城水污水处理厂及合肥市经济技术开发区污水处理厂外排废水浓度为其排放标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）中一级 B 标准对应污染物浓度的 80%¹⁰。计算结果 2007 年 WFgrey2=994.369 万吨，对应污染物为总磷、石油类。

图表 10 2007 年 WFgrey2 计算结果

污染物	水足迹（万吨）
总磷	994.369
石油类	994.369
NH3-N	473.843
BOD5	68.989
LAS	40.071
COD	22.720

- 鉴于 2007 年调研工厂废水排放中石油类造成的灰水足迹为 0，即不产生灰水足迹，而 2007 年调研工厂废水排放中主要污染物总磷，经由市政污水处理厂处理后，虽然得到有效的削减，但仍然是 WFgrey2 的主要贡献污染物，因此，取总磷对应 WFgrey2 值为调研工厂 2007 年运行水足迹值，计算结果为 994.369 万吨。

2008 年

调研企业自 2007 年 10 月起停止向城市水污水处理厂外运高浓度工业废水，并开始筹建其污水处理站三期项目，该项目于 2008 年 5 月投入使用。此后，调研企业包括生活污水在内的所有污水经由其自备污水处理站处理达标后，纳入合肥经济技术开发区污水处理厂处理。2008 年 5 月前的生活污水排放情况无统计数据，估算为 30000 吨。2008 年整年废水排放量为 255379 吨。

- 2008 年 WFgrey1 计算根据调研企业提供的 2008 年 1 月-12 月，共计 11 份《监察监测联动工业企业废水排放结果》、1 份 2008 年 2 月份委托监测报告，及 2008 年整年 COD 在线监测数据，汇总各污染物平均排放浓度进行计算，计算结果如下：

图表 11 2008 年 WFgrey1 计算结果

污染物	水足迹（万吨）
石油类	363.429
总磷	277.622
LAS	239.582
COD	113.021
BOD5	92.557
NH3-N	0

¹⁰ 虽然根据工厂提供的《联合利华合肥工业园扩建项目（牙膏车间搬迁及 SPRINT 改扩建项目）环境影响报告表》，合肥经济技术开发区污水处理厂出水排放执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中一级 A 标准，但在其提供的 2010 年监测数据中，对应执行标准为一级 B 标准。因此，本次水足迹计算过程中，选择《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中一级 B 标准，作为其废水排放标准。

- 2008年 WFGrey2 计算，根据调研企业提供的 2008 年 1 月-12 月，共计 12 份《监察监测联动工业企业废水排放结果》计算，计算结果如下：

图表 12 2008 年 WFGrey2 计算结果

污染物	水足迹（万吨）
总磷	699.111
石油类	102.942
COD	4.934
NH3-N 水	0
BOD5	0
LAS	0

- 鉴于 2008 年调研工厂主要污染物石油类经由市政污水处理厂后，得到了有效削减，削减后对应水足迹值为 102.942 万吨；而位列第二的污染物总磷，经市政污水处理厂后，其灰水足迹值非但没有得到降低，反而因其他工厂废水的排入而升高，且对应 WFGrey2 值为本年度最大 WFGrey2 值，由此判断，调研工厂所排总磷经市政污水处理厂处理后，未得到削减，但其高出部分不应视为调研工厂所为，因此 2008 年总磷对应 WFGrey1 值为调研工厂该年度运行灰水足迹值，计算结果为 277.622 万吨。

2009 年

- 2009 年 WFGrey1 计算，根据调研企业提供的 2009 年 1 月-10 月，共计 9 份《监察监测联动工业企业废水排放结果》、1 份 2009 年 2 月份委托监测报告，及 2009 年整年 COD 在线监测数据，汇总污染物平均排放浓度进行计算，计算结果如下：

图表 13. 2009 年 WFGrey1 计算结果

污染物	水足迹（万吨）
总磷	212.443
COD	70.262
LAS	0
NH3-N	0
石油类	0
BOD5	0

- 2009 年 WFGrey2 计算，根据调研企业提供的 2009 年 1 月-12 月，共计 12 份《监察监测联动工业企业废水排放结果》计算，计算结果如下：

图表 14 2009 年 WFgrey2 计算结果

污染物	水足迹 (万吨)
总磷	377.801
石油类	193.660
BOD5	75.191
NH3-N	24.564
COD	0
LAS	0

- 2009 年调研工厂及市政污水处理厂灰水足迹对应主要污染物均为总磷，对应灰水足迹值 WFgrey2> WFgrey1，调研组认为，本次水足迹调研工厂的主要污染物总磷，经污水处理厂处理后，没能得到有效削减，但市政污水处理厂灰水足迹值高出部分不应视为调研工厂的责任，因此，本年度运行水足迹值为总磷对应的 WFgrey1，计算结果为 212.443 万吨。

2010 年

- 2010 年 WFgrey1 计算，根据调研企业提供的 1 份 2010 年 1 月 8 日《监察监测联动工业企业废水排放结果》、2 份 2010 年委托监测报告，及 2010 年整年 COD 在线监测数据，汇总污染物平均排放浓度进行计算，计算结果如下：

图表 15 2010 年 WFgrey1 计算结果

污染物	水足迹 (万吨)
COD	58.811
LAS	26.208
总磷	1.533
NH3-N	0
石油类	0
BOD5	0

- 2010 年 WFgrey2 计算，根据调研企业提供的 20 年 08 月-12 月，共计 5 份《监察监测联动污水处理厂监测结果》，及 2010 年整年废水在线监测数据计算，计算结果如下：

图表 16 2010 年 WFgrey2 计算结果

污染物	水足迹 (万吨)
总磷	743.2047
石油类	198.4168
NH3-N	1.3978
BOD5	1.1759
COD	0
LAS	0

-
- 对比图表 15、16，市政污水处理厂灰水值中位列前三的污染物 COD、LAS、总磷中，COD、LAS 经污水处理厂处理后得到有效削减，而总磷经污水处理厂后对应灰水足迹值反而升高，未得到削减，但市政污水处理厂灰水足迹值高出部分不应视为调研工厂的责任，因此，本年度运行水足迹值为总磷对应的 WFgrey1，计算结果为 1.533 万吨。¹¹

¹¹根据 2009、2010 年度实际运行灰水足迹的计算，可以看出，调研企业对于主要污染物 BOD₅、石油类指标监测不足，对灰水足迹计算、指标选取有较大影响。建议在后续的环境管理过程中加强这两个污染指标的监测，以对灰水足迹的产生情况有更全面的判断。

4、计算结果及其说明

4.1 计算结果

本次水足迹计算，分别计算了调研企业 2007-2010 年企业运行灰水足迹,企业运行蓝水足迹,以及 2009,2010 年度各分厂的运行水足迹包括灰水足迹，蓝水足迹，计算结果如以下图表所示。从表中可以看出,企业蓝水足迹仅从 2007 年的 24.995 万吨小幅减少到 2010 年的 21.767 万吨,但是企业运行水足迹却从 2007 年的 1019.364 万吨大幅度减少到 2010 年的 23.3 万吨。

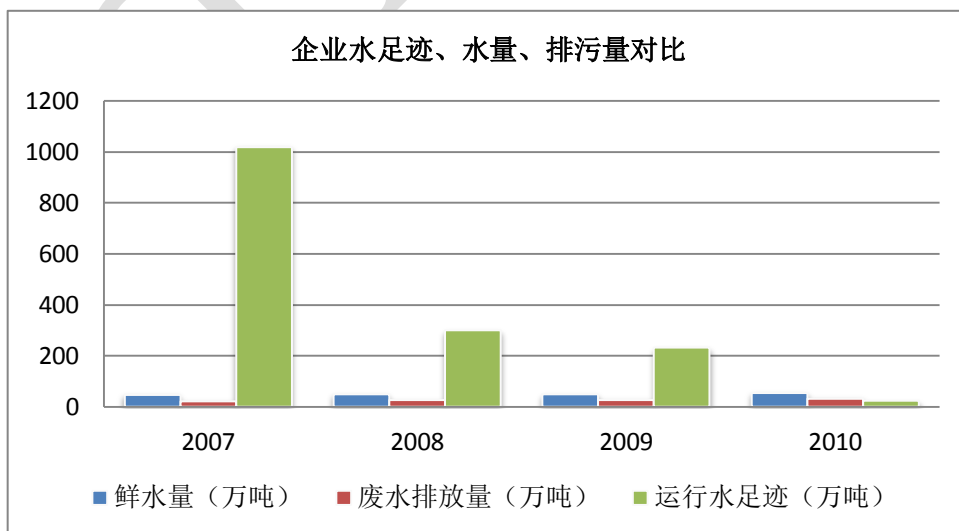
图表 17 案例企业 2007-2010 年运行水足迹计算结果

年份	2007	2008	2009	2010
运行灰水足迹 (万吨)	994.369	277.622	212.443	1.533
运行蓝水足迹 (万吨)	24.995	23.215	20.240	21.767
运行水足迹 (万吨)	1019.364	300.836	232.683	23.300

4.2 计算结果说明

此次水足迹计算研究系总体上基于水足迹手册（2011）计算方法、同时结合中国水环境的实际情况而开展的。计算结果发现，如下图所示。企业运行水足迹与企业鲜水使用量、污水排放量上存在关联关系，在鲜水使用量、排污量保持基本稳定的同时，企业仍可以通过多种措施大幅度降低其运行水足迹。从计算结果看，灰水足迹在企业水足迹中占有相当大的比重，即企业灰水足迹对企业整体运行水足迹的大小具有相当大的影响。

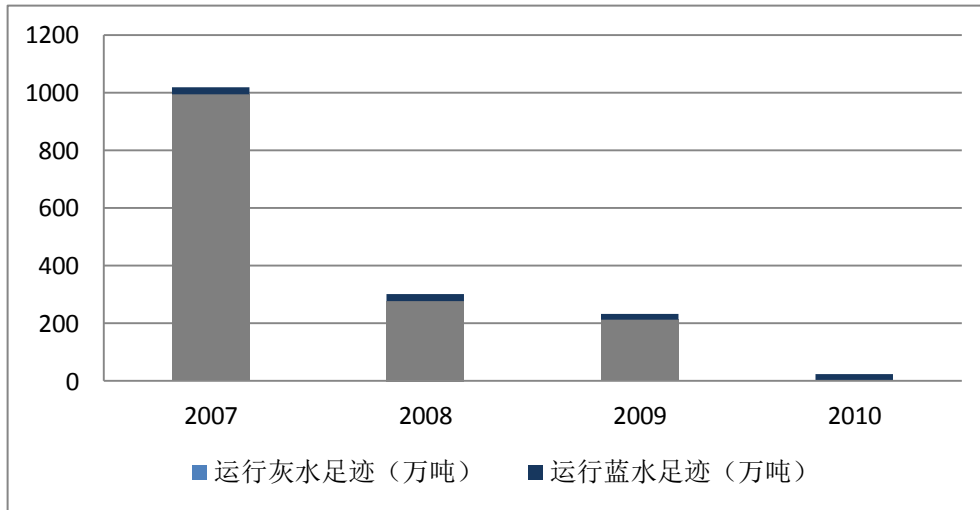
图表 18 企业水足迹、水量、排污量对比



4.2.1 灰水足迹在企业的运行性水足迹中可能占有较大比重

对照企业 2007-2010 年的水足迹构成，可以看到前面三年的灰水足迹远远大于蓝水足迹。尤其在 2007 年，其运行灰水足迹达到了 994.369 万吨，占其运行水足迹比例为 97.55%。可见，当企业未能对其废水进行严格管理的情况下，其灰水足迹可能会远远大于其蓝水足迹，也就是它实际消耗的水量。

图表 19 案例工厂运行水足迹构成

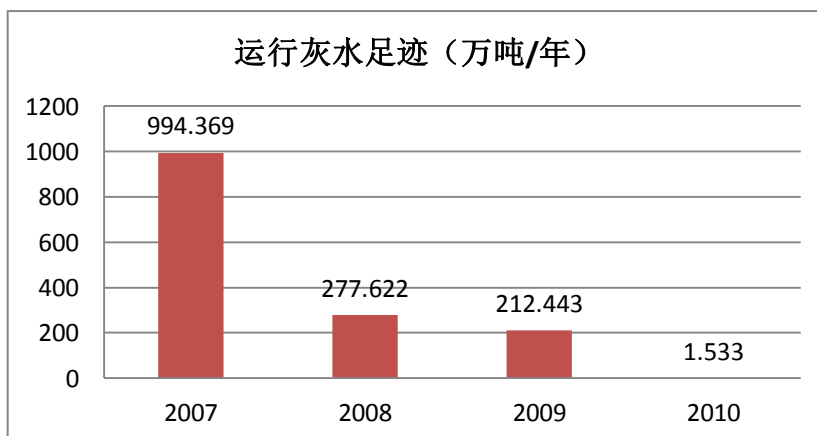


4.2.2 改进治污措施大幅度降低灰水足迹

- 截止 2010 年的改进
 - 升级、改造治污设施

调研企业自 2007 年 10 月份起对其废水设施进行了升级改造，建设污水处理站三期项目，该项目于 2008 年 5 月投入运行后，极大降低了废水出水中化学需氧量等指标浓度(COD 浓度从 153mg/L 降低到 52.35mg/L)，如下图所示。

图表 20 运行灰水足迹¹²



¹² 根据计算结果，2007-2010 年运行灰水足迹值对应污染物为总磷。

■ 纳管排放

图表 21 运行灰水足迹对比

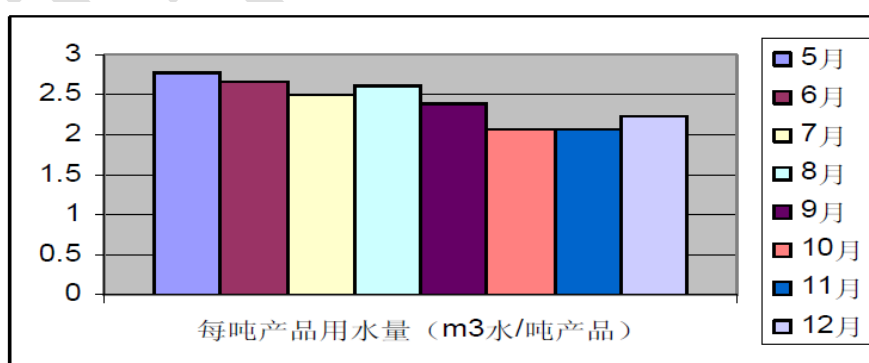
年份	2007	2008	2009	2010
直接排放的灰水足迹（万吨）	1202.580	363.429	212.443	58.811
纳入污水厂后的运行灰水足迹（万吨）	994.369	277.622	212.443	1.533

本次调研企业废水纳入市政污水处理厂处理后排放，从图表 21 可以看出，调研工厂的废水在通过其自备的污水处理设施处理后，若直接排入天然水体，其在 2010 年产生的灰水足迹为 58.811 万吨，对应污染物为 COD¹³，而该废水若经市政污水处理厂处理后再排入天然水体，其灰水足迹值将削减为 1.533 万吨，有效地降低了其灰水足迹值。废水的集中处理，除有效的降低水足迹外，还能够将其企业的运行成本，故本次调研认为，当地是否具备市政污水处理厂等基础设施非常重要，应作为投资时考虑因素之一。

■ 工艺改进，减少废水排放

调研企业自 2007 年后期起，通过设置生产矩阵排列减少产品切换频率（产品替换按照从浅入深，比如，白色—蓝色—黑色，以避免不必要的清洗）、改善洗涤方法、某些高浓度（LAS）的污水送到洗衣粉厂使用等改进方案，减少污水排放量，根据 2007 年 5 月至 12 月的统计，每吨产品用水量由 2007 年 5 月的 2.77m³ 降至 2007 年 11 月每吨产品用水量 2.06 m³，具体如图表 22 所示。自 2007 年起调研企业一直在贯彻实施该工艺改进方式，并结合其他的减排措施，从图表 23 可看出，其单位产值水足迹自 2007 年起呈显著下降趋势。

图表 22 单位产品水耗



➤ 2011 年起的新改进：循环用水，减少废水排放量

据调研工厂介绍，自 2011 年起启动其中水回用系统¹⁴，废水经由前期废水处理设施处理后，再经由消毒、砂滤、精密过滤、超滤后回用于市政绿化，及厂区冲厕等。通过该中水回用措施，调研企业可在一定程度上降低其水资源的使用量，及污水的排放量，从而降低其水足迹。

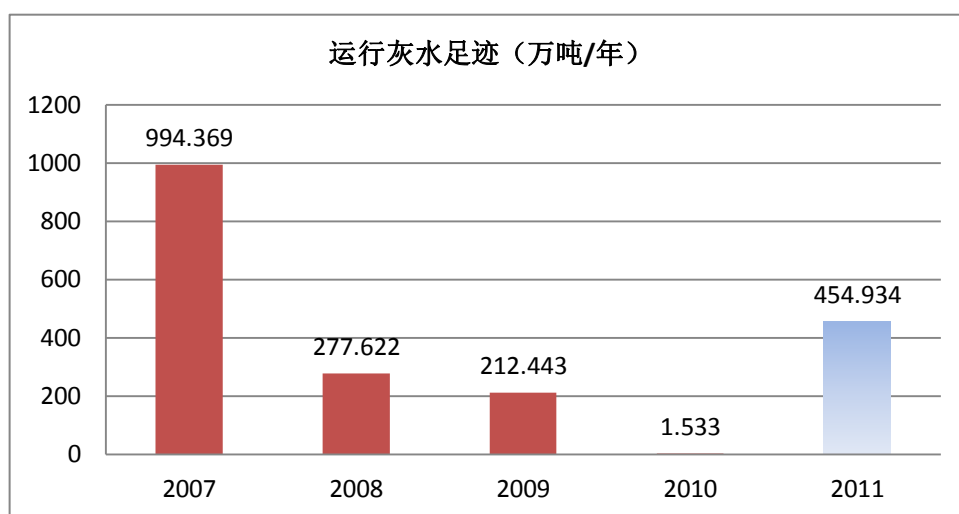
¹³ 根据调研工厂提交的资料，工厂 2010 年废水排放中的 COD 平均浓度为 52.35mg/L（污水综合排放标准 GB8978-1996 中，COD 一级标准为 100 mg/L）。

¹⁴ 鉴于调研期间该中水系统刚刚启动，缺乏充足数据，本次水足迹调研未对此进行相应计算。

➤ 待改进项

- 调研企业自 2007 年 10 月份起对其废水设施进行的升级改造，但升级后的废水处理系统对总磷等污染物的削减较为有限，而根据 2007 年--2010 年灰水足迹的计算结果，影响调研工厂灰水足迹的主要污染物为总磷，而市政污水处理系统对该污染物的削减也非常有限，有时甚至起不到削减作用。根据 2007—2010 年度调研工厂水足迹计算，虽然，在此期间，调研工厂通过污水处理系统的综合升级改造、加强管理等方式对污水排放中的总磷浓度起到一定的降低作用，但整体上，调研工厂并未将总磷纳入主要控制污染指标，对总磷的监控力度也不够，因此，在 2011 年仅有的一次总磷检测中，其浓度达到 0.388mg/L，按照该浓度以及 2007—2010 年市政污水处理厂对调研工厂总磷的削减力度，2011 年度总磷造成的灰水足迹可能升至 454.934 万吨，如图表 21 所示。

图表 21 2011 年度运行灰水足迹



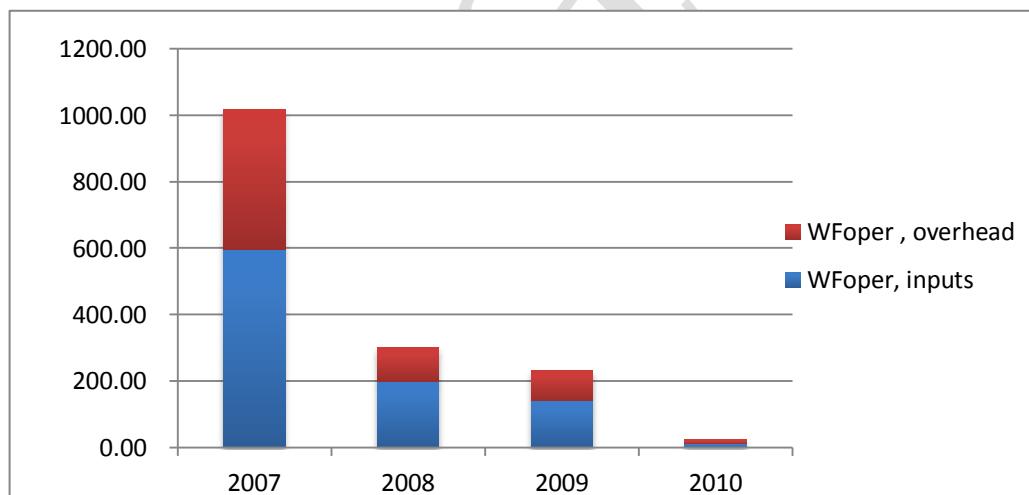
4.2.3 不应忽略保证性水足迹

保证性水足迹指企业运行过程中与生产不直接相关的水资源消耗或者水污染的淡水量，本文研究企业的保证性水足迹如图示。2007-2010 年，在企业产能从 35.01 万吨增加到 55 万吨的同时企业运行水足迹从 306.9 万吨降低到 78.47 万吨，其中各年度保证性运行水足迹占比 26.43%-38.12%，这表明，如果要降低水足迹，企业不应该只关注与生产直接相关的灰水足迹，而且也应关注保证性水足迹，即从降低生活污水方面考虑减少企业运行水足迹。

图表 24. 生产运行水足迹及保证性运行水足迹

类别	运行水足迹 (万吨/年) / 占比							
	2007 年		2008 年		2009 年		2010 年	
生产运行水足迹	597.74	58.64%	198.84	66.10%	142.13	61.08%	10.90	46.79%
保证性运行水足迹	421.63	41.36%	102.00	33.90%	90.55	38.92%	12.40	53.21%
总计 (万吨/年)	1019.36		300.84		232.68		23.30	

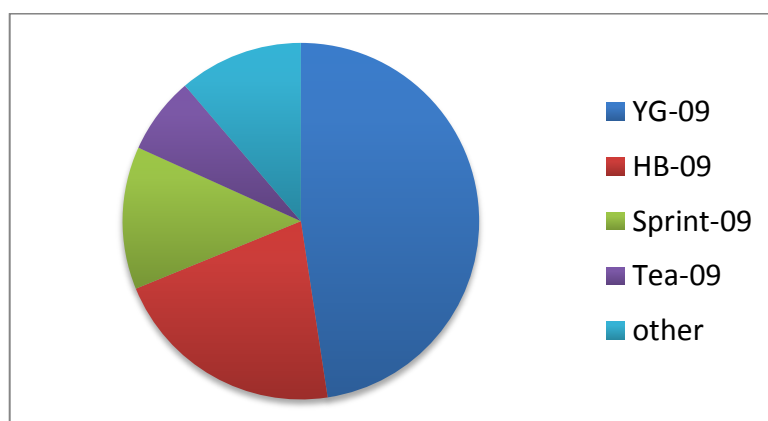
图表 25 生产运行水足迹及保证性运行水足迹 (万吨/年)



4.2.4 从绿色供应链角度考虑减少水足迹

本次研究，还分别对该企业四个分厂单元进行了 2009 年 2010 年水足迹计算，各分厂的运行水足迹及构成如图所示。

图表 26 2009 年度各分厂水足迹构成



不难看出，调研工厂中 YG、HB、Sprint 分厂水足迹构成全厂水足迹的绝大部分。在三分厂中，蓝水足迹占了相当大的比例，大部分蓝水作为成分之一带入了产品，这部分蓝水足迹其可降低的潜力不大。企业通过自身采取的污染治理设施改进、工艺改进、中水回用、纳管等措施降低其运行水足迹后，可再降低水足迹的潜力将逐渐变得有限。但在企业供应链的环节，还可能蕴藏着降低水足迹的巨大空间。

5. 发现及建议

5.1 针对企业的发现和和建议

- 企业首先应该加强对废水排放的检测和记录。在研究中我们发现企业对自身污水排放的检测有限，因此数据样本较少，这影响了其代表性，进而也影响计算结果的准确性。例如作为产生主要灰水足迹的污染物总磷，其 2010 年只有 3 个检测数值，而 2011 年只有 1 个检测数值。依据如此有限的检测值所计算的结果，难以精确体现企业的灰水足迹。

在目前改进的基础上，企业未来要进一步降低其水足迹，本研究建议如下：

- 降低灰水足迹。建议企业可通过对废水进行深度处理并循环使用，从而直接减低废水的排放，降低灰水足迹。此外，企业可以从改进工艺流程，提高冲洗效率，从根本上减少灰水的产生。企业四个分厂中，YG 厂的灰水足迹最大（2009 年灰水足迹占该企业年度灰水足迹的 47.6%；2010 年其灰水足迹占该年度企业灰水足迹 42.76%）。建议企业重点关注如何对其采取针对性措施降低其灰水足迹。
- 降低蓝水足迹。可以从两方面进行，一方面通过工艺改进优化产品配比加强用水管理等措施，减少进入产品的水资源，通过减少鲜水使用量降低蓝水足迹；另一方面，提高污水处理效率，污水可进一步深度处理达到重复利用的水质标准，同时加大中水回用量从而减少蓝水足迹。
- 关注供应链水足迹。本次研究企业的四个分厂中，tea 厂的运行水足迹最小，但如果计算 tea 厂整体水足迹，其水足迹不一定最小，因为其供应链的水足迹可以预计数值将会很大。此外，企业通过一系列降低其运行水足迹后，可再降低水足迹的潜力将非常有限，而其供应链上尚存在水足迹降低空间。因此，企业除了自身采取降低水足迹措施外，还应从绿色供应链角度考虑减少水足迹。水足迹的计算是降低水足迹的前途，建议企业选取几家原材料供应量大的供应商逐步展开供应链水足迹的计算。

5.2. 水足迹计算方法的发现及结论

- 根据调研，《水足迹评价手册》中的水足迹计算方法适用于工业企业水足迹计算

水足迹在农业方面的已有所应用，但在工业企业应用则很少，通过本次日化企业的调研，我们认为，该方法同样适用于工业企业的水足迹计算。

- 工业企业水足迹计算在中国非常必要

目前中国污染负荷已远超其环境容量。通过行之有效的的水足迹计算公式，推算目前国内的生产经营活动造成的水资源间接消耗，对比现有的水资源剩余量，则可能促动或推动政府，企业采取措施降低污染物排放，从而降低水足迹，这对降低中国目前污染负荷而言，非常必要。

此外，通过水足迹计算，企业或政府可计算历年的水足迹对比情况，从而将其减排工作定性、量化，通过计算结果，可分析尚存的降低水足迹潜力和方向，从而为降低污染负荷提供更好的依据和方向。

-
- 企业要利用好水足迹工具，首先应该加强对废水排放的检测和记录。数据样本少，将影响其代表性，进而也影响计算结果的准确性。
 - 《水足迹评价手册》中的灰水足迹计算方法待进一步探讨

根据水足迹手册，在企业污水排入市政污水处理厂后经过处理达标排放（低于当地排放标准）排入周围水体环境时，其灰水足迹等于零，即其排污不产生灰水足迹。鉴于目前中国水环境污染严重，污染负荷已远超其承载能力，且市政污水处理厂在运行中存在超标排放、偷排甚至擅自停运等各种弊病，其处理后的废水浓度并不能达到低于自然浓度，因而也需要消耗自然资源用于净化其排入的污染物质。因此，本次水足迹调研认为，在中国，企业废水纳管后，同样产生水足迹，其水足迹不等于 0。

《水足迹评价手册》对计算指标选择未做详细说明，尤其对企业废水纳入市政污水处理厂后，灰水足迹中的指标选取未做说明。本次水足迹调研认为，当企业水足迹对应的污染物浓度低于经过污水处理厂排放出的该污染物浓度时，那么该污染物指标不应该成为计算企业水足迹的依据，原因在于污水处理厂的污染物排放浓度比企业排放浓度升高所造成的水足迹不是企业所致，实际水足迹的计算应当以水足迹数计算值排第二或依次类推的其他污染物作为灰水足迹指标。

- 是否具有成熟的环保基础设施对企业水足迹的影响显著。

本次水足迹调研发现，企业废水纳入市政污水处理厂处理后，其废水中污染物浓度大部分会降低，这直接大幅减少了企业产生的灰水足迹；同时废水的集中处理，还能够同时降低企业的运行成本。

因此，本次调研认为，当地是否具备市政污水处理厂等基础设施非常重要，应作为投资时考虑因素之一。

建议企业与市政部门和污水处理厂保持沟通，一是推动其处理设施稳定运行，避免减排效果落空；二是推动其进一步改善工艺，迈向深度处理，协助企业进一步降低灰水足迹。

- 降低水足迹、实现水平衡有赖于深度处理和循环用水

随着市政污水处理基础设施的配套到位以及企业自备污染治理设施的完善，企业降低灰水足迹的空间将减小。

与此同时，随着企业经营规模的扩展，企业在产品生产和后勤保障中的水消耗不可避免的都将提升，这将意味着企业蓝水足迹势必将会增长。

通过深度处理，实现水资源高效循环使用，不仅有利于企业同时降低灰水和蓝水足迹，而且可以协助企业迈向真正意义上的水平衡。

- 进一步开展供应链水足迹计算

企业水足迹包括运行水足迹及供应链水足迹，通过采取纳管、中水回用等措施后，企业自身水足迹的进一步降低的潜力有限。而其上游供应商的环境表现在一定程度上影响其水足迹，建议在企业水足迹计算基础，进一步开展供应链水足迹计算，为进一步降低水足迹提供空间。