

引用格式: 马北玲, 敖瞳, 朱康福, 等. 数字技术赋能半导体制造业水资源绿色管理的理论模式与实践探索[J]. 资源科学, 2023, 45(12): 2311-2321. [Ma B L, Ao T, Zhu K F, et al. Theoretical model and practical exploration of digital technology-empowered green management of water resource in semiconductor manufacturing industry[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2311-2321.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.02

数字技术赋能半导体制造业水资源绿色管理的理论模式与实践探索

马北玲^{1,2}, 敖瞳³, 朱康福⁴, 李勇刚⁵, 何天祥^{1,2}

(1. 湖南工商大学公共管理与人文地理学院/碳中和与智慧能源湖南省重点实验室, 长沙 410205; 2. 长沙人工智能社会实验室, 长沙 410205; 3. 中南大学公共管理学院, 长沙 410083; 4. 许继电源有限公司, 许昌 461000; 5. 中南大学自动化学院, 长沙 410083)

摘要:【目的】本文关注半导体制造业中基于数字技术的水资源绿色管理问题, 从技术赋能角度分析建立水资源绿色管理的综合框架, 为半导体制造业的数字技术应用和行业绿色发展提供理论范式和实践指导。【方法】通过对国内外相关主题文献进行系统梳理, 吸收多学科解决方案来构建新的循环经济模式, 建立了半导体制造企业的水资源绿色管理系统方案, 并采用案例分析方法, 选择一家典型的半导体制造企业, 深度剖析技术框架应用过程。【结果】①基于循环经济模式的“减量化, 再利用, 再循环”3R原则, 采用系统分析的方法, 构建了数字技术赋能水资源绿色管理的理论模式。②在理论模式中阐释了从源头到终端各生产环节的数字技术赋能内涵、特征与作用, 分析3R原则框架下各企业采取的具体措施, 揭示了数据技术赋能水资源绿色管理的作用路径。③通过华东某半导体制造企业的案例研究, 实现了水资源智能绿色管理技术方案的实践探索, 其2020—2022年数据的变化趋势表明, 数字技术创新与水资源绿色管理的收益基本呈正相关, 且创新幅度越大所获收益就越高。【结论】数字技术可以为半导体制造企业提供创新的水资源绿色管理方案, 从而提升企业的竞争力, 对处在新发展阶段的中国半导体制造业强化数字技术创新主体地位、提升水资源绿色智能管理具有启示意义。

关键词: 数字技术; 半导体制造业; 水资源; 减量化; 再利用; 再循环

DOI: 10.18402/resci.2023.12.02

1 引言

随着半导体制造过程的精细化和产量的不断提升, 半导体企业对水资源的需求也呈现出愈加迫切的态势^[1-3]。2021年全球最大的24家半导体企业的总水资源消耗高达7.51亿m³^[4], 这一消耗量约等于同年上海市居民生活用水总量的53%^[5]。半导体企业的总水资源消耗中, 绝大部分的水经过处理后转换成超纯水, 并用于清洁硅片和冷却设备等^[6]; 而从供水来源看, 地表取水、市政用水、地下水抽取、第三方供水分别占被调研半导体企业总供水量的47.0%、35.3%、8.5%和5.8%, 而再生水仅占3.2%^[1]。

通过引入高效的废水处理技术, 例如光催化技术^[7]、电化学技术^[8]、先进膜技术^[9]等, 企业可以减少洁净水的使用, 同时也可以将废水中的有用物质分离和回收^[9,10]。随着数字技术的发展, 半导体制造企业借助数据进行绿色决策、绿色控制与绿色创新, 减少水资源的输入, 加强水资源的再利用和再循环, 将是一个需要长期不断优化问题^[11]。

随着大数据、物联网、人工智能、区块链等数字技术迅猛发展^[12-14], 企业采取了多种创新性的水资源管理策略。智能水资源管理^[15,16]可为半导体行业提供创新性的解决方案。通过在水资源管理中引

收稿日期: 2023-09-15, 修订日期: 2023-12-01

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目(22A0439); 国家社会科学基金项目(22BJY121); 湖南省杰出青年基金项目(2022JJ10085)。

作者简介: 马北玲, 女, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为资源能源环境管理。E-mail: mbling@126.com

入数字技术,半导体制造企业可以实现更高效的水资源分配和反复利用,降低水资源消耗^[17,18]。然而,当前研究鲜有从微观、内生性视角揭示数字技术与企业水资源绿色管理之间的理论机制、作用路径及协同发展关系,它们之间的内在逻辑尚存在很多黑箱需要揭示。因此,本文在现有循环经济理论中嵌入数字技术,拓展新的理论和方法,并从更微观、内生性视角探索数字技术与水资源绿色管理的关系,以期系统、全面地促进半导体制造业水资源绿色高效管理提供借鉴。

2 文献综述与实践构想

到目前为止,许多企业已经开始探索水的回收和循环再利用策略,使企业减少对洁净水源的依赖^[19-21]。传统的水处理和回收技术,通常采用物理、化学和生物处理方法,如沉淀、絮凝、生物氧化等废水处理手段^[22],长期以来在半导体行业的水资源管理中占据了重要地位。随着技术的进步,新型的处理方法也得到广泛应用,如电化学处理^[23,24]、反渗透膜(RO)^[25]、超滤(UF)^[26,27]和陶瓷膜微滤^[28]技术。其中,电化学处理能够有效去除水中的有害物质,特别是重金属,其处理速度快且简单,不需要添加化学试剂或生物物质,但极度依赖电能;与其他有机膜相比,陶瓷膜具有更长的使用寿命和更高的耐化学性,能有效去除水中的悬浮物、细菌和某些溶解物。总的来说,上述技术提高了废水处理的效率,实现了有害物质的有效分离和资源的回收利用^[29]。

随着自然资源和生态环境保护之间的矛盾日益加剧,传统的水资源管理方法已经不能满足可持续发展的需求,而数字技术为此提供了新的思路和方法^[30,31]。随着工业3.5和工业4.0的不断推进^[32,33],信息物理系统(CPS)、智能制造物联网(IoT)以及服务互联网(IoS)^[34]高速发展,推动了数字技术在水资源管理中的应用^[35],半导体制造业开始探索新的水资源管理策略。一方面,通过部署传感器和数据分析平台,可实时监测生产过程中的水资源使用情况和水处理过程,利用大数据分析工具进行数据分析,为不同的处理方法提供更有针对性的参数设置^[33,36-38]。另一方面,通过机器学习和人工智能可预测废水的成分和处理效果,从而为各种方法的选择

提供数据支持^[39-41]。数字技术还可以进一步帮助企业预测水资源需求、优化生产流程,从而实现更高效的水资源利用^[4,37]。

随着全球半导体市场竞争的加剧,降本增效已成为行业新趋势,越来越多半导体制造企业在生产经营管理的各个环节寻找降低成本、增强竞争优势的方法,部分半导体制造企业已经将数字技术引入水资源绿色管理,并将其作为重要工具和竞争优势。如英特尔和台积电合作将数字技术引入工业生产过程,通过先进制程技术优化生产过程,削减资源消耗^[42,43];中芯国际则将数字技术运用于透明度与合规性方面,确保水资源管理的透明性,方便与政府、监管机构和公众的沟通,确保公司的操作和管理达到法定标准^[44];索尼在优化水资源分配方面使用了数字管理系统,帮助工厂精准了解各环节的水资源消耗,努力减少用于半导体生产的水量,同时增加生产能力,从而更科学地分配和利用水资源,增加废水的重用率^[45];联华电子则积极推动实现自动化与智能调控,其结合物联网技术,自动化调控水资源的供应来源和排放量,保证生产的稳定和环境的安全^[46]。

总的来说,数字技术为半导体制造业的水资源绿色管理提供了新的技术支持。通过引入数字技术,半导体制造企业不仅可以提高生产效率,还可以实现更为绿色、可持续的水资源管理。但目前的局部应用难以有效应对复杂的资源环境管理,需要将数字技术与先进的水处理技术、环境友好的生产工艺和可持续的资源管理策略相融合。因此,构建可拓展、可推广的数字技术驱动水资源绿色管理的理论模式,揭示数字技术与半导体制造企业水资源绿色管理的新特征、新规律,为数字技术与水资源绿色管理动态耦合发展提供依据,将是实现水资源绿色管理目标的有效途径之一。

3 数字技术赋能的理论模式

半导体制造企业水资源绿色管理的关键,在于实现工厂的循环经济模式^[47]。减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle)是循环经济的基本原则(以下简称3R原则),3R原则对循环经济的技术范式给出了清晰的刻画。本文参考环境与经济系统的物质流动关系及水流动关系两个概念模型

2023年12月

的基础上,引入3R原则,采用基于数字技术的智能管控手段,构建了数字技术赋能的水资源循环经济模式(图1)。数字技术的发展和应用,为面向水资源绿色管理的循环经济模式带来了新的活力。通过大数据、云计算、物联网、区块链等数字技术收集处理资源供给与利用数据、污染排放数据、环境质量数据以及经济收益数据等,已初步形成了针对整个循环经济系统的智能管控网络。该网络包含了众多生产要素,其有机组合效应可以实现包含数据智能分析、要素智能监测、工艺智能优化、需求智能预测、业务智能决策、过程智能控制等在内的功能。基于IC insights和美国半导体行业协会发布的行业信息,参考了20家半导体制造企业的情况^[42-46,48-62],通过企业CSR和ESG报告,深入总结国内外多个半导体制造企业在制造过程中对水资源的需求利用数据与节水成果,通过在3R原则实践的每一个阶段应用数字技术,从源头的减量化到终端的再循环,探究数字技术赋能水资源绿色管理的理论框架。

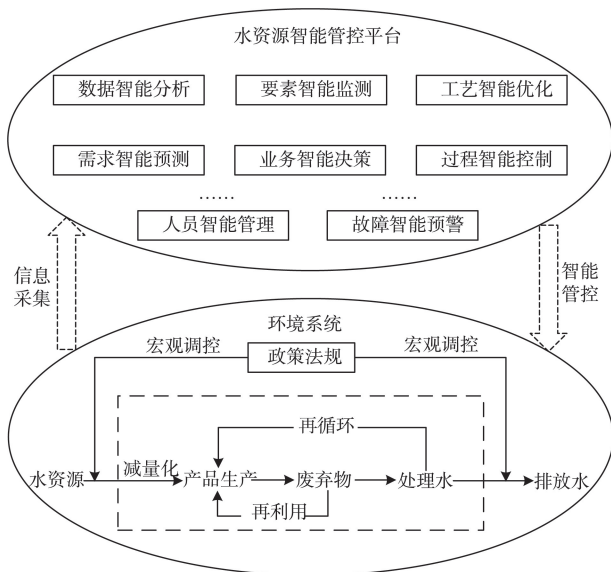


图1 数字技术赋能的水资源循环经济模式

Figure 1 The water resource circular economy model empowered by digital technology

3.1 减量化模式

数字技术赋能减量化模式的基本思想是:在生产过程中通过技术进步等手段,减少资源消耗和废物的产生,从而在满足同样生产需求的同时,使用更少的原料和人力投入。这种模式的目标是从源

头节约资源、减少污染,实现可持续发展。数字技术的引入为减量化模式提供了新的可能性。数字技术可为水资源减量化提供实时监测、数据分析、过程控制到管理决策等在内的全方位支持,在生产起始阶段即实现对水资源的有效管理和节约使用。通过建立水资源中央数据管理和存储系统,集中管理和存储诸如水质、流量、压力、水位等传感器数据资源,并通过图形化数据分析工具或分析软件对资源使用和工艺需求的当前情况与未来趋势进行对比分析、精细调节及综合管理,以便迅速应对任何异常情况。例如当用水量需求减少时,系统会通过数据分析感知需求变化,从而减小水资源的计划使用量。又例如当流量超过阈值时,系统会自动减小阀门流量,使流量回归正常,从而减少水资源的输入。上述监控过程最大程度上确保了系统的正常运行、水资源的有序供应以及工艺处理过程的高效管理,并大幅优化水资源的利用率,从而获得最理想化的投入产出比。

国内外许多大型企业正在采取行动实施水资源减量化模式。例如:中芯国际建立了高度互联的基础设施信息网络,其以工业大数据设立数据库,实现信息的一体化集成,同时将工业生产数据与数据分析软件平台相结合,对实时加工过程进行数据分析与工艺控制,对不同工艺间的生产需求进行智能化联动调整,大幅提高了原始资源的利用率和生产效率,从而减少水资源的输入^[44]。英特尔利用人工智能和物联网构建的智能设施,在采集资源使用数据、工艺生产数据和经济活动数据的基础上,进一步通过人工智能预测未来一段时间内业务活动的变化趋势,并提供可视化的数据建议和管理策略,从而实现数据驱动的资源分配,工艺流程优化和减少输入^[42]。索尼在优化水资源分配方面同样使用了数字管理系统,帮助企业精准地了解各个环节的水资源消耗,努力减少用于半导体生产的输入水量^[45]。

3.2 再利用模式

数字技术赋能再利用模式的基本思想是:通过数字化手段尽可能多次以及尽可能多种方式使用物品,以减少资源的使用量和污染物的排放量。这一模式的核心是提高物品和服务的利用效率防止

物品过早地成为废品。通过设计实时控制系统、远程监控和操作系统、通讯与报警系统等,可多次、多方式地回收利用水资源,从而提高水资源的再利用效率。其中,基于物联网技术的水资源实时控制系统,确保了企业水处理过程始终处于最佳状态,该系统通常融合了传感器和自动化技术,可以实时监控回收水的水质、流量、压力、生物处理单元的氧气供应和污泥浓度等关键参数,根据数据反馈自动调整泵的速度或调节阀门开度以对回收水的处理速度进行控制,在兼顾水资源回收效率的同时确保水质始终符合规定的标准。而远程监控和操作系统允许远程访问、监控和操作水资源设备,这使得控制系统不仅有一个即时的自动反馈控制机制,还允许工程师和操作人员通过网络访问远程监控仪表盘,管理水资源处理过程,并根据相关趋势制定管理计划,确保回收水资源调度始终处于最佳状态。最后由通讯与报警系统实现数据流动的闭环,通过对资源变化和任务执行始末过程的完整记录,从容应对水资源回收再利用过程中的问题和紧急情况。相关人员可在第一时间发现异常情况并采取必要措施,最大限度减少资源浪费。

为了达成这一目标,自2021年以来,台积电在自建的私营再生水厂中,搭建了高效的水处理过程数据监测网络,以促进工艺水的回收利用,凭借多维度信息,通过实时控制系统管理冷却水回收工艺过程,其工厂内水资源再利用率达到约18%;预计到2030年,台积电的日常用水中有约60%来自回收后再投入的工艺用水^[43]。韦尔半导体则增加了带有智能化监控单元的反渗透水(RO)处理系统,优化了现有的水资源循环利用系统,2022年的水资源回收率由约45%提高至约66%^[48]。三星采用了先进的反渗透过滤技术以最大限度地提高水的再利用率,其在制造基地设计了一系列先进的制造和研发设施,用于数据存储和运行数字化的解决方案,该基地成为第一个获得碳信托水标准的半导体基地^[49]。高塔半导体通过数字技术创新改变水资源再利用和管理水平,其工厂创建了物理水基础运维设施的网络虚拟副本,从SCADA系统、物联网传感器等仪器仪表中收集现实数据,并实时向副本中注入,数字孪生系统结合算法计算可以更有效地管理区域用水,

辅助工艺间的回收水资源调度,同时帮助检测水泄漏并预测系统故障^[50]。

3.3 再循环模式

数字技术赋能再循环模式的基本思想是:要求废弃物再次变成资源以减少最终处理量,在原级再循环中,数字技术能对废弃物进行详细分析,明确其组成,从而精确地将其还原为原始形式;而在次级再循环中,通过数字技术的数据分析,可以帮助确定废弃物最佳的转化路径,从而提高资源的再使用效率。可持续性水资源回收系统利用数字传感器和智能算法,结合区块链技术,对每一任务周期中的废水进行实时跟踪,为废水净化过程提供详实的数据支持,以保证最大程度的水资源循环利用率。此外,人工智能和大数据还可以对未来一段时间内企业可用水资源的变化情况及用水需求进行预测,蓄丰补枯,将雨水等季节性水资源按需存储,从而降低企业对城市供水的依赖程度,实现预防性的资源管理。更进一步地,由于不同的工艺对应用其中的水资源处理程度的要求存在差异,通过数字模型分析和预测,可制定所需循环再生水的生产时间和需求量计划,将不同处理阶段以及不同处理程度的废水再应用于工艺流程中进行生产活动,从而获得经济高效的资源再循环方案。不难看出,数字技术为半导体制造企业实现水资源循环利用提供了多样化的创新方式,可减少环境污染、降低成本,并满足可持续发展目标。

为了实现这一目标,长江存储投资建设了动态分类分流收集废水系统,其根据废水成分与浓度建立共计29种10大类废水处理模块,综合生产状况和处理能力,全面落实废水分类收集处理,动态调整废水循环处理方案,从中获得可以满足工艺循环利用的有机废水以及满足法律法规的可排放处理水^[51]。英飞凌则进行了多样化的水循环处理尝试,并实施精确可预测的循环回收规划,在2022年财政年度,英飞凌将约70%的非危险废物废水和约71%的危险废物废水进行了循环利用^[52]。华虹半导体建设了氮氨废水循环站,增设仪器仪表拓展数据采集范围,其建设的自动控制系统在不影响循环再生效果的前提下有效减少了处理时间,目标到2030年时单位产品的用水量减少约12%^[53]。英特尔也建立了

2023年12月

大规模的水循环设施,其年均回收约295万t的水,这主要得益于英特尔在水管理中大量使用的物联网设备、用于优化节水策略数据分析的大数据模型以及用于高效水循环和处理的自动化系统^[42]。

3.4 平衡模式

由区域水资源的物质平衡方程可知,资源的总量是受限的,企业水资源绿色管理不仅与企业内部的技术应用相关,还受所处环境、地方政策、行业竞争等诸多因素影响。企业的运营往往会影响其所在地区的环境,而一个地区有限的水资源也会影响企业的运营策略,为确保企业循环经济模式的稳定性和可持续性,需充分考虑企业与环境相互作用。只有了解和考虑所在地区的物质平衡,将区域内所有的输入和输出都考虑在内,企业才能预测和管理与环境、政策以及其他外部因素相关的风险,只有当企业与其所在的生态系统和环境形成和谐共生关系时,它的长期生存和繁荣才能得以保障。运用系统科学的原理和方法,从动态、联系、整体的视角,通过建立区域监测系统,实时收集企业所在地的水文、气象以及企业自身的用水数据,识别如洪涝、干旱等自然灾害以及用水事故等水风险,对其进行风险评估,确定其可能的影响程度并及时预

警以制定风险应对计划,如建立防洪防涝体系、设置应急供水设施等,明确应对流程、责任分工和资源调度,确保风险发生时,企业能够迅速、有序地应对,保障企业水资源绿色管理内外部平衡的实现。

4 数字技术赋能的实践案例

基于前述构建的理论模式,A公司以3R原则为基础,借助数字技术赋能水资源管理,应用了如下的数字技术方案(图2)。在该方案中,使用大数据平台充分运用数字化技术优势,对水资源输入、水资源处理以及水资源回收再利用等流程进行可视化以及信息化管理,同时运用数字化手段实现了资源智能监测、需求智能预测、过程智能控制、异常智能预警等,通过智能化管控实现了单位产品用水量的逐年减少及生产效率的提高。例如,通过分析历史数据和外部因素,系统可以预测出不同时间段的水资源利用情况以及使用需求,这种预测能力有助于企业更加合理地安排水资源使用计划,避免过度消耗或浪费;同时,通过异常智能预警及时发现异常情况并及时采取措施,避免异常所带来的停水停工等情况。

通过对A公司2020—2022年ESG报告中的水资源使用情况进行分析,可以得出A公司在水资源

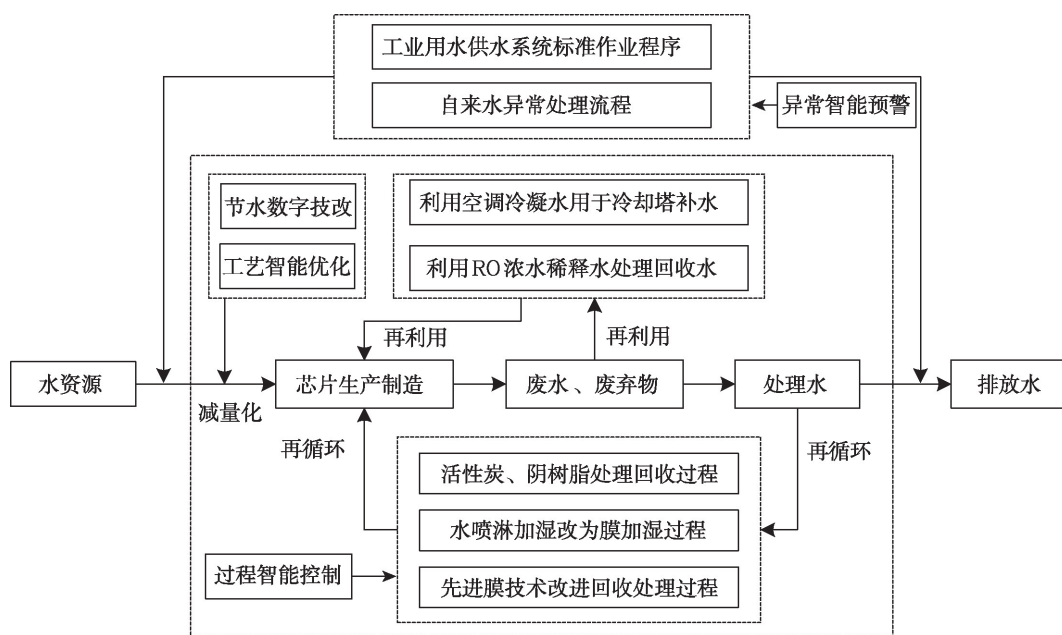


图2 A公司数字技术赋能的水资源循环经济模式

Figure 2 The water resource circular economy model empowered by digital technology in company A

管理方面的具体情况和趋势。在减量化方面,A公司持续对企业运营区域水资源现状开展智能监测,通过使用外部工具——世界资源研究所(World Resources Institute)输水道水源风险地图(Aqueduct Water Risk Atlas),并结合了历史数据对企业生产运营的用水合理性及取水可能造成的影响进行分析与监测;此外,通过建立大数据模型,系统可以预测出不同时间段的水资源利用情况以及使用需求,这种预测能力有助于企业更加合理地安排水资源使用计划,避免过度消耗或浪费。公司在保证合理用水需求的同时节约水资源,维护可持续的水平衡,实现全方位减少各环节水资源消耗,持续降低生产系统和工艺系统的耗水量。

在再利用以及再循环方面,由于A公司主要依赖市政供水,其积极拓展供水来源,逐渐实现纯水制造工艺过程中的余量水和空调冷凝水的回收利用,将余量水回收用于其他制程,将空调冷凝水用于补充冷却塔水位等。此外,A公司开展了用水风险的智能分析与预警,在各个晶圆厂区建立了用水监测点收集监测数据,并定期开展水平衡测试,利用大数据与水平衡模型对厂内制程用水、回收水、废水、生活用水等的水流向、流量与回收再利用情形进行分析,通过异常智能预警及时发现异常情况并采取措施,可避免异常所带来的停水停工等情况。另一方面,在水资源回收处理以及生产过程中,企业利用先进的过程智能控制技术,通过在处理水以及用水过程中根据过程反馈状态智能调控流量等关键参数,在避免水资源浪费的同时提升了过程的运行效率。同时,为将数字化智能化管控手段与公司经营管理紧密结合,制定了《工业用水供水系统标准作业程序》《自来水异常处置流程》等管理制度,建立健全台账管理,定期对使用情况进行统计、分析和改善。在采取了上述措施之后,A公司水资源管理工作取得了较大成效。其2020年通过

技术应用所取得的效果包括:①技术升级逐渐减少了废气洗涤塔补水量,全年回收节水约50000 t;②建设了RO浓水稀释水处理系统,全年回收节水约15000 t;③优化了纯水系统再生冲洗水时间,全年循环节水约8400 t;④优化了纯水系统MMF反洗设定,全年循环节水约5000 t。2021年在上一年的水资源数字化管理基础上,在公司内开展了更广泛的技术更新与应用,进一步的成效包括:①实施BE-WAAS05技术,降低了纯水使用量,实现全年循环节水约5000 t;②通过先进膜技术改造,FAB1水喷淋加湿改为膜加湿,实现全年循环节水约13200 t。2022年在前两年的基础上持续优化水资源管理工作,取得的成效包括:①优化各种工艺流程中产生的清洗废水的回收利用,将生产中产生的含无机酸有机物且较洁净的清洗水进行单独收集,并将其输送到中转槽。对于水质不合格的废水,将其排入工业废水系统进行处理;而对水质合格的清洗水,则通过活性炭、阴树脂处理后回收至纯水系统二次利用,以减少自来水用量和废水处理量,回收水约为7580 t/日;②对反渗透处理超纯水制水系统中产生的一级RO浓水进行稀释等适当的处理,使其达到再利用的标准,回收水约为2300 t/日;③回收空调系统产生的冷凝水,用于冷却塔及废气洗涤补水,回收水约为440 t/日。

以上列举了A公司通过一些具体措施得到的回收水量和循环水量,加上公司还有其他的节水措施,总的年度用水量汇总在表1中。从表中可以看到2020—2022年,通过数字技术赋能智能水资源管理,A公司的用水总量增加了81.8%,但市政供水只增加了46.2%,回收再利用水量增加了169%,单位产品用水量降低到原来的85.1%,而循环用水量猛增了2551.2%。即A公司在用水需求大幅增长的同时对外部水资源依赖仅小幅增加,由于前述的数字技术创新应用,3年来回收水量显著增加,循环/再利

表1 2020—2022年的A公司用水量汇总

Table 1 Summary of water consumption in Company A, 2020-2022

年份	用水总量/万t	市政供水量/万t	回收再利用水量/万t	循环用水量/万t	单位产品用水量/(t/8英寸晶圆)
2020	990.77	703.53	287.24	404.20	2.89
2021	1570.72	892.80	678.83	8611.93	2.55
2022	1801.02	1028.41	772.62	10716.36	2.46

2023年12月

用水量极大增加,单位产品用水量逐年下降,水资源的减量化、再利用与再循环工作取得了明显成效,提高了生产效率和水资源使用效率,改善了水资源绿色管理水平。此外,2020—2021年数据的变化幅度远大于2021—2022年的变化幅度,主要原因是2021年公司开展了大幅度的数字技术应用创新,新技术的应用优化了生产工艺,大幅减少了单位产品耗水量,提高了水资源回收率和再生效率,即绿色管理的收益与数字技术的创新应用基本呈正相关趋势,创新幅度越大收益越高,通过数字化技术的应用,实现了更加高效、可持续的水资源管理,该案例分析有力地验证了本文所提3R分析模式的合理性和有效性。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文通过对国内外半导体制造业相关主题文献进行系统梳理,基于3R原则构建了水资源绿色管理的综合框架,为新时期半导体制造业竞争新优势与可持续发展提供了经验借鉴。主要得出以下结论:

(1)通过对国内外相关主题文献进行系统梳理,从动态、联系、整体的视角分析了数字技术与水资源绿色管理动态耦合的作用机理,以此为逻辑起点,基于循环经济模式“减量化,再利用,再循环”原则,构建了数字技术赋能水资源绿色管理的理论模式。该模式是新格局下,培育国家级战略性新兴产业竞争新优势的重要路径。

(2)阐释了理论体系框架中从源头到终端的各生产环节数字技术内涵、特征与作用,以及水资源的绿色管理方法。实现对水资源使用状况的实时管理,涉及数据采集和监控、中央数据管理和存储、远程监控和操作、实时控制、数据分析和优化等,为半导体制造业提供了一个全面的框架,旨在实现水资源的高效、可持续和绿色管理。

(3)通过华东某半导体制造企业的案例研究,实现了水资源智能绿色管理技术方案的实践探索,其2020—2022年数据的变化趋势表明,数字技术创新与水资源绿色管理的收益基本呈正相关关系,且创新幅度越大所获收益相应就越高。说明了数字

技术创新在半导体制造业水资源绿色管理有着正向的推动作用。

5.2 讨论

新一代信息技术的发展与应用正在推动传统企业生产模式与管理模式的变革,本文基于理论梳理与案例分析,提出了数字技术赋能的水资源管理循环经济模式,从系统的视角揭示了数字技术赋能水资源绿色管理的作用路径,并明确了其带来的成效。但需指出的是,作为一个尝试性理论模式,其仍存在一定局限,由于半导体制造过程涵盖了多个关键工序,如晶圆制备、光刻、刻蚀、镀膜、化学机械抛光和封装测试等,每个工序都有其特定的减量化、再利用和再循环策略。目前的理论模式主要是从企业的角度出发,然而,它未能充分考虑这些不同制造工序之间的差异性。此外,数字技术在赋能水资源管理方面的广度和深度仍显不足。当前,半导体行业在实践水资源管理的循环经济时,虽然逐渐形成了侧重点不同的模式,但尚未实现全要素、全流程、全生命周期的水资源绿色智能管理。

随着大数据、区块链、人工智能等新一代信息技术的发展及其与传统行业的深度融合,半导体企业的水资源循环经济管理也将朝着更加网络化、智能化的方向迈进。一方面,可运用区块链等在工业物联网技术实现企业内外部与水资源相关资源要素的全面互联;同时,加大深度学习模型在全流程供水能力、水质参数、用水需求预测中的应用与融合力度,构建更大规模、精细划分过程的数据集,训练精度更高的预测模型;另一方面,可进一步将人工管理经验与人工智能技术进行融合,实现水资源循环经济管理业务的可靠智能决策。因此,数字赋能的水资源循环经济模式在理论与实践方面存在较大的发展前景与空间,其不仅需要高校、研究所、企业等进行产学研合作、联合攻关,同时由于其涉及管理学、信息学等不同学科的知识,需要进行多学科的交叉融合,完善并发展这一理论模式。

参考文献(References):

- [1] Wang Q, Huang N, Chen Z, et al. Environmental data and facts in the semiconductor manufacturing industry: An unexpected high water and energy consumption situation[J]. Water Cycle, 2023, 4:

- 47–54.
- [2] Frost K, Hua I. Quantifying spatiotemporal impacts of the interaction of water scarcity and water use by the global semiconductor manufacturing industry[J]. *Water Resources and Industry*, 2019, DOI: 10.1016/j.wri.2019.100115.
- [3] Frost K, Hua I. A Spatially Explicit Assessment of Water Use by the Global Semiconductor Industry[C]. Phoenix: 2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, 2017.
- [4] Wang Q, Huang N, Cai H Y, et al. Water strategies and practices for sustainable development in the semiconductor industry[J]. *Water Cycle*, 2023, 4: 12–16.
- [5] 上海市水务局. 2021年上海市水资源公报[R/OL]. (2022-08-26) [2023-07-12]. <https://swj.sh.gov.cn/szy/20220826/3c3c96965f194e199cb256b6f71bb6b9.html>. [Shanghai Water Authority (Shanghai Municipal Oceanic Bureau). *Shanghai Water Resources Bulletin*[R/OL]. (2022-08-26) [2023-07-12]. <https://swj.sh.gov.cn/szy/20220826/3c3c96965f194e199cb256b6f71bb6b9.html>.]
- [6] Teow Y H, Chiah Y H, Ho K C, et al. Treatment of semiconductor-industry wastewater with the application of ceramic membrane and polymeric membrane[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 10.1016/j.jclepro.2022.130569.
- [7] Loeb S K, Alvarez P J J, Brame J A, et al. The technology horizon for photocatalytic water treatment: Sunrise or sunset?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53, 2937–2947.
- [8] Tran T K, Kim N, Le Q C, et al. Electrochemical preparation and characterization of polyaniline enhanced electrodes: An application for the removal of cadmium metals in industrial wastewater[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, DOI: 10.1016/j.matchemphys.2021.124221.
- [9] Su Y N, Lin W S, Hou C H, et al. Performance of integrated membrane filtration and electrodialysis processes for copper recovery from wafer polishing wastewater[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2014, 4: 149–158.
- [10] Shin C H, Kim J Y, Kim J Y, et al. A solvent extraction approach to recover acetic acid from mixed waste acids produced during semiconductor wafer process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2): 1278–1284.
- [11] 周斌. 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项解析[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 472–478. [Zhou B. Analysis of the national key R&D program “efficient development and utilization of water resources”[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 472–478.]
- [12] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望[J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 208–224. [Chen X H, Li Y Y, Song L J, et al. Theoretical framework and research prospect of digital economy [J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(2): 208–224.]
- [13] 陈晓红, 张威威, 易国栋, 等. 新一代信息技术驱动下资源环境协同管理的理论逻辑及实现路径[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2021, 27(5): 1–10. [Chen X H, Zhang W W, Yi G D, et al. The theory logic and realization path of resource and environment coordinated management driven by new generation information technology[J]. *Journal of Central South University (Social Sciences)*, 2021, 27(5): 1–10.]
- [14] 杨来科, 闫珂. 数字化转型对中国制造业企业污染排放的影响: 基于微观层面的三维面板数据分析[J]. *资源科学*, 2023, 45(8): 1481–1496. [Yang L K, Yan K, et al. Impact of digital transformation on pollution emissions of manufacturing enterprises in China: A micro-level analysis based on three-dimensional panel data[J]. *Resources Science*, 2023, 45(8): 1481–1496.]
- [15] Gude V G. Desalination and water reuse to address global water scarcity[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2017, DOI: 10.1007/s11157-017-9449-7.
- [16] Hoo R. Managing water demand in Singapore through a systems perspective[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2020, 36(6): 1–9.
- [17] Yaqub M, Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 681: 551–563.
- [18] 尤碧莹, 郑明贵, 胡志亮, 等. 数字化转型对资源型企业全要素生产率的影响[J]. *资源科学*, 2023, 45(3): 536–548. [You B Y, Zheng M G, Hu Z L, et al. The impact of digital transformation on total factor productivity in resource-based firms[J]. *Resources Science*, 2023, 45(3): 536–548.]
- [19] Jeonghoo S, Jonghun L, Hojung R, et al. A review of semiconductor wastewater treatment processes: Current status, challenges, and future trends[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.139570.
- [20] Meese A F, Kim D J, Wu X H, et al. Opportunities and challenges for industrial water treatment and reuse[J]. *ACS ES&T Engineering*, 2021, 2(3): 465–488.
- [21] You S H, Tseng D H, Guo G L. A case study on the wastewater reclamation and reuse in the semiconductor industry[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 32(1): 73–81.
- [22] Yang G C C. CMP wastewater management using the concepts of design for environment[J]. *Environmental Progress*, 2002, 21(1): 57–62.
- [23] Feng A, Feng J, Xing W, et al. Versatile applications of electrochemical flow-through systems in water treatment processes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, DOI: 10.1016/J.CEJ.2023.145400.
- [24] O’Connor M P, Coulthard R M, Plata D L. Electrochemical deposition for the separation and recovery of metals using carbon nano-

2023年12月

- tube-enabled filters[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4(1): 58–66.
- [25] Eng C Y, Yan D N, Withanage N, et al. Wastewater treatment and recycle from a semiconductor industry: A demo-plant study[J]. *Water Practice & Technology*, 2019, DOI: 10.2166/wpt.2019.020.
- [26] Sim S I, Teow Y H. Integrated Membrane-Adsorption System as a Sustainable Development Approach for Semiconductor-Industry Wastewater Treatment[C]. Johor Bahru: The 2nd Regional Congress on Membrane Technology 2022 in Conjunction with the 16th AUN/SEED-NET Regional Conference on Environmental Engineering 2022, 2022.
- [27] Qiu Y, Ren L F, Xia L, et al. Investigation of fluoride and silica removal from semiconductor wastewaters with a clean coagulation-ultrafiltration process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 10.1016/j.cej.2022.135562.
- [28] Lo R, Lo S L. A pilot plant study using ceramic membrane microfiltration, carbon adsorption and reverse osmosis to treat CMP (chemical mechanical polishing) wastewater[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2004, 4(1): 111–118.
- [29] Brown P T, Raley B. Waste Treatment for Advanced Semiconductor Packaging Operations[C]. Austin: Twenty Third IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1998.
- [30] 方冬莉. 数字经济对中国城市能源利用效率的影响: 基于技术赋能和技术外溢视角[J]. *资源科学*, 2023, 45(2): 296–307. [Fang D L. Impact of digital economy on energy utilization efficiency of Chinese cities from the perspective of technology empowerment and spillover[J]. *Resources Science*, 2023, 45(2): 296–307.]
- [31] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素: 基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1522–1534. [Wang K L, Liu Y, Shi L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors based on two-step analysis of EBM-Tobit Model[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1522–1534.]
- [32] Lin Y S, Chien C F, Chou D. UNISON decision framework for hybrid optimization of wastewater treatment and recycle for Industry 3.5 and cleaner semiconductor manufacturing[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106282.
- [33] Chien C F, Chen Y J, Han Y T, et al. Industry 3.5 for optimizing chiller configuration for energy saving and an empirical study for semiconductor manufacturing[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105247.
- [34] Kagermann H, Hellbig J, Hellinger A, et al. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0[R]. Munich: National Academy of Science and Engineering, 2013.
- [35] Liu Q, Yang L, Yang M. Digitalisation for water sustainability: Barriers to implementing circular economy in smart water management [J]. *Sustainability*, 2021, DOI: 10.3390/SU132111868.
- [36] Lu B S, Lee M S, Chen S T, et al. Strategic optimization of water reuse in wafer fabs via multi-constraint linear programming technique[J]. *Water-Energy Nexus*, 2018, 1(1): 86–96.
- [37] Yim Y H. Reclamation of Industry Wastewater as a Renewable Source for Cooling Water System: A Case Study for a Semiconductor Plant[D]. Kuala Lumpur: University of Malaya, 2018.
- [38] Chandrasekaran N. Intelligent, Data-driven Approach to Sustainable Semiconductor Manufacturing[C]. Oita: The 6th Electron Devices Technology and Manufacturing Conference, 2022.
- [39] Chasey A, Striffler E. Water Reclaim Strategies for the Microelectronics Industry[C]. Orlando: Construction Congress VI: Building Together for a Better Tomorrow in an Increasingly Complex World, 2000.
- [40] Alwi S R W, Manan Z A, Samigin M H, et al. A holistic framework for design of cost-effective minimum water utilization network[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(2): 219–252.
- [41] Pirson T, Delhay T, Pip A, et al. The Environmental Footprint of IC Production: Meta-Analysis and Historical Trends[C]. Milan: 2022–IEEE 52nd European Solid-State Device Research Conference, 2022.
- [42] Intel. Corporate Responsibility Report 2022–23[R/OL]. (2023–05–17) [2023–07–12]. <https://csrreportbuilder.intel.com/pdfbuilder/pdfs/CSR-2022-23-Full-Report.pdf>.
- [43] TSMC. TSMC 2022 Sustainability Report[R/OL]. (2023–05–18) [2023–07–12]. https://esg.tsmc.com/download/file/2022_sustainabilityReport/english/e-all.pdf.
- [44] SMIC. 2022 Environmental, Social and Governance Report[R/OL]. (2023–03–28) [2023–07–12]. https://www.smics.com/site/news_read/3594.
- [45] Sony. Sustainability Report 2023[R/OL]. (2023–09–12) [2023–07–12]. https://www.sony.com/en/SonyInfo/csr/library/reports/SustainabilityReport2023_E.pdf.
- [46] UMC. 2022 UMC Sustainability Report[R/OL]. (2023–07–16) [2023–07–12]. https://www.umc.com/upload/media/07_Sustainability/72_Reports_and_Results/1_Corporate_Sustainability_Reports/CSR_Reports/CS_Report_English_pdf/2022_CSR_report_eng/UMC_2022_Sustainability_Report_En.pdf.
- [47] 董君, 叶春明. 具有学习效应的半导体晶圆制造绿色车间调度问题研究[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(4): 217–223. [Dong J, Ye C M. Research on green job shop scheduling problem of semiconductor wafers manufacturing with learning effect[J]. *Operations Re-*

- search and Management Science, 2021, 30(4): 217-223.]
- [48] OV. Omni Vision 2022 Sustainability Report[R/OL]. (2023-06-14) [2023-07-12]. <https://www.omnivision-group.com/doc/OV-ESG-20220406-Report-cn.pdf>.
- [49] Samsung. Samsung Electronics Sustainability Report 2023: A Journey Towards Asustainable Future[R/OL]. (2022-06-01) [2023-07-12]. https://www.samsung.com/global/sustainability/media/pdf/Samsung_Electronics_Sustainability_Report_2023_ENG.pdf.
- [50] TSEM. 2020 Corporate Sustainability (ESG) Report[R/OL]. (2021-08-01) [2023-07-12]. <https://towersemi.com/3d-flip-book/2020-corporate-esg-report/>.
- [51] YMTC. 环境安全与健康(ESH)政策(2022)[R/OL]. (2022-06-29) [2023-07-12]. <https://www.ymtc.com/cn/resources/file/20220629/b95556b45cf7766267691c21bf15429e.pdf>. [YMTC. Environmental Safety and Health (ESH) policy[R/OL]. (2022-06-29) [2023-07-12]. <https://www.ymtc.com/cn/resources/file/20220629/b95556b45cf7766267691c21bf15429e.pdf>.]
- [52] Infineon. Sustainability at Infineon: Supplementing the Annual Report 2022[R/OL]. (2022-11-25) [2023-07-12]. https://www.infineon.com/dgdl/Sustainability_at_Infineon_2022.pdf?fileId=8ac78c8b84a33cb40184bd6a9c8f0035.
- [53] Huahong. 2022 Environmental, Social and Governance (ESG) Report[R/OL]. (2023-04-20) [2023-07-12]. https://www.huahong-grace.com/download/esg2022_cn.pdf.
- [54] KIOXIA. Sustainability Report 2022[R/OL]. (2023-04-20) [2023-07-12]. <https://www.kioxia-holdings.com/content/dam/kioxia-hd/en-jp/sustainability/asset/2022-Sustainability-KIOXIA-EN.pdf>.
- [55] Winbond. Electronics Sustainability Report 2022[R/OL]. (2023-02-25) [2023-07-12]. https://www.winbond.com/export/sites/winbond/about-winbond/csr-new/downloads/report/2022-WINBOND-ESG-REPORT_CH.pdf.
- [56] PSMC. Sustainability Report 2022[R/OL]. (2023-04-27) [2023-07-12]. https://esg.powerchip.com/upload/media/sustainability_report/psmc-ESG-report-2022.pdf.
- [57] VIS. Sustainability Report 2022[R/OL]. (2023-04-20) [2023-07-12]. https://media-vis.todayir.com/20230608151420379722131_en.pdf.
- [58] ROHM. ROHM Integrated Report 2022[R/OL]. (2023-02-20) [2023-07-12]. https://micro.rohm.com/en/financial/integrated-report/EN_rohm_group_integrated_report2022vi.pdf.
- [59] NXP. 2022 NXP Corporate Sustainability Report[R/OL]. (2023-01-20) [2023-07-12]. <https://www.nxp.com/docs/en/supporting-information/Corporate-Sustainability-Report-2022.pdf>.
- [60] GFS. Corporate Responsibility Report 2023[R/OL]. (2023-06-20) [2023-07-12]. <https://gf.com/wp-content/uploads/2023/06/GF-CRR-23.pdf>.
- [61] SK Hynix. SK Hynix Sustainability Report 2023[R/OL]. (2023-06-30) [2023-07-12]. <https://www.skhynix.com/sustainability/UI-FR-SA01>.
- [62] SWKS. Skyworks 2022 Sustainability Report[R/OL]. (2023-04-20) [2023-07-12]. <https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Brochures/SustainabilityReport2022.pdf>.

Theoretical model and practical exploration of digital technology–empowered green management of water resource in semiconductor manufacturing industry

MA Beiling^{1, 2}, AO Tong³, ZHU Kangfu⁴, LI Yonggang⁵, HE Tianxiang^{1, 2}

(1. Hunan Key Laboratory of Carbon Neutrality and Intelligent Energy, School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. Changsha Social Laboratory of Artificial Intelligence, Changsha 410205, China; 3. School of Public Administration, Central South University, Changsha 410083, China; 4. Xuji Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 5. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: [Objective] This study focused on the green management of water resources in the semiconductor manufacturing industry based on digital technology. It analyzed the establishment of a comprehensive framework for green management of water resources from the perspective of technological empowerment, providing theoretical paradigm and practical guidance for the application of digital technology and the green development in the semiconductor manufacturing industry. [Methods] By systematically reviewing relevant literature on the domestic and international levels and incorporating multidisciplinary solutions, an innovative circular economy model was constructed. The article established a water resource green intelligent management system for semiconductor manufacturing enterprises, and used a case study method to select a typical semiconductor manufacturing enterprise, then deeply analyzed the application process of the technological framework. [Results] (1) Based on the “reduction, reuse, recycle” 3R principle of the circular economy model, and utilized the systematic analysis method, a theoretical model for the digital technology-empowered green management of water resources framework was built. (2) The theoretical model explained the connotation, characteristics, and functions of digital technology empowerment from the source to the end of each production process. It analyzed the specific measures of each enterprise under the 3R principle, and revealed the action path of data technology in empowering green management of water resources. (3) Through a case study of a semiconductor company in East China, the practical exploration of intelligent water resources green management technology solutions was achieved. The trend of data change over the past three years indicated a basic positive correlation between digital technology innovation and the benefits of green management of water resources, with higher benefits corresponding to higher innovation levels. [Conclusion] Digital technology can provide innovative green water resources management solutions for semiconductor manufacturing companies, enhancing their competitiveness. For the new development stage of the Chinese semiconductor manufacturing industry, it has significant implications for strengthening the dominant position of digital technology innovation and improving intelligent green management of water resources.

Key words: digital technology; semiconductor manufacturing; water resource; reduction; reuse; recycle