

大气中的水资源利用：雾和露水可持续集水方法综述

杨晨曦^{1,2,3,4*}, 王 健^{1,2,3,4}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2023年10月8日; 录用日期: 2023年11月9日; 发布日期: 2023年11月21日

摘 要

本文综述了大气中的雾和露水可持续集水方法。首先, 介绍了全球范围内各种类型的集雾器及其集水性能, 并对一些可行性研究和效率改进的技术进行了回顾, 其中包括以生物为灵感的现代创新技术。但是, 由于全球雾发生的限制, 雾收集技术在实际应用中存在困难。相比之下, 露水采集器虽然需要冷却冷凝表面, 但更为普遍使用。最后, 将露水收集系统分为三类: 1) 使用辐射冷却表面收集露水, 2) 太阳能干燥剂系统, 3) 主动冷凝技术。所有这些方法的关键目标是开发一种成本低廉、可以利用当地材料制造、无论湿度水平或地理位置如何, 都能产生水的大气集水器。

关键词

大气集水, 集雾器, 仿生

Utilization of Water Resources in the Atmosphere: A Review of Methods for Continuously Collecting Water from Mist and Dew

Chenxi Yang^{1,2,3,4*}, Jian Wang^{1,2,3,4}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²ShaanXi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 杨晨曦, 王健. 大气中的水资源利用: 雾和露水可持续集水方法综述[J]. 世界生态学, 2023, 12(4): 423-429.
DOI: 10.12677/ije.2023.124051

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 8th, 2023; accepted: Nov. 9th, 2023; published: Nov. 21st, 2023

Abstract

This article reviews the sustainable water collection methods of fog and dew in the atmosphere. Firstly, various types of mist collectors and their water collection performance worldwide were introduced, and some feasibility studies and efficiency improvement technologies were reviewed, including modern innovative technologies inspired by biology. However, due to the limitations of global fog occurrence, there are difficulties in the practical application of fog collection technology. In contrast, dew collectors, although required to cool the condensing surface, are more commonly used. Finally, dew collection systems are divided into three categories: 1) dew collection using radiative cooling surfaces, 2) solar desiccant systems, and 3) active condensation technology. The key goal of all these methods is to develop a low-cost atmospheric water collector that can be manufactured using local materials and generate water regardless of humidity levels or geographical location.

Keywords

Atmospheric Catchment, Mist Collector, Biomimetic

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

水资源缺乏是自然资源中最重要的问题之一, 不仅影响人类生存和发展, 也严重威胁着全球生态系统的完整性和生态平衡[1] [2]。迄今为止, 在全球范围内, 水资源缺乏的人数约为 21 亿, 直接影响人类的身体健康和生存环境, 以及人类经济和社会的稳定性。因此加强水资源保护和开发新型水资源可以保障全球水资源的持续供应和可持续发展具有重要意义[3] [4]。

目前, 已有许多方法可获取淡水, 例如通过海水淡化、地下水抽取和雨水收集等[5] [6]。显然, 为了使水资源发挥效应, 液态水必须可直接利用。在干旱半干旱地区, 可直接利用的水资源较少, 因此开发新型水资源供给具有重要意义。大气集水是一种利用大气中存在的水分, 在特定条件下将其冷凝为液态水并收集起来的技术[7] [8]。这种技术可以解决某些地区的缺水问题, 特别是在那些水资源匮乏的地方。它可以利用自然的水循环过程, 收集大气中的水分, 并将其转变为可用的水资源。目前, 已经开发出了两种主要的大气集水装置: 被动集水装置和主动集水装置。被动集水装置完全依赖于天气条件, 用于收集预先凝结的露水或雾汽; 而主动装置则利用太阳能在夜间湿度较高时收集大气水并使之凝结, 或者连续循环工作, 从而缩小了装置所需的尺寸。吸附式空气取水系统也是一个重要的研究方向, 它涉及到吸附剂材料、装置结构、应用、驱动能源和环保安全性等多个方面。目前, 已经开发出了多种吸附剂, 包括基于物理吸附的传统固体吸附剂、具有理想孔道结构的新型聚合物吸附剂、以吸湿盐为主的化学吸附剂以及多孔基质与吸湿盐结合的复合吸附剂。然而, 现有的 AWH 方法, 如雾收集和露水收集, 都存在

一些局限性。例如, 雾收集过程只能在相对湿度达到 100% 的环境中进行, 而露水收集则需要高能耗的制冷方式来使水分凝结, 且环境湿度不能低于 50%。

本文综合了全球范围内各种类型的集雾器及其集水性能, 并回顾了一些可行性研究和效率改进技术, 其中包括以生物为灵感的现代创新技术。同时也讨论了全球雾发生限制对于雾收集技术在实际应用中存在困难的问题, 并提出相比之下, 露水采集器更为普遍使用的解决方法。最后, 我们将露水收集系统分为三类, 并探讨了所有这些方法关键目标的开发方向, 即建造一种成本低廉、可以利用当地材料制造、无论湿度水平或地理位置如何都能产生水的大气集水器。

2. 大气集水

大气集水技术的收集方式分为从雾中和从露水中收集水, 因此集雾器可设计为被动集水装置和主动集水装置。动集水装置完全依赖天气条件, 用于收集预先凝结的露水或雾汽; 而主动装置则利用太阳能在夜间湿度较高时进行采集并凝水, 或者连续循环工作, 从而缩小了装置所需的尺寸。从雾中收集水主要是通过捕捉悬浮在空气中的可见云、雾或冰晶等固体颗粒实现[9] [10]。另一种方式是从水蒸气中收集水, 当水蒸气冷却到低于露点时形成“露水”[11] [12]。对于雾水的收集, 一般使用网状结构材料实现。而收集露水的技术则分为主动冷凝和被动冷凝虽然被动冷凝效率较低, 但能源消耗较少; 而主动冷凝系统的能源消耗较大, 但收集效率较高。

2.1. 传统集雾器

传统的雾水收集方法比较简单, 通常使用网格结构材料, 利用风力使雾与材料互动, 网格可以筛选捕获雾水, 随着重力作用被导流到水收集设备中[13]。该技术现在商业规模应用的主要材料是拉舍尔网, 该材料的主要制备原料为聚乙烯[14]。拉舍尔网结构类似于网状塔, 其上部形成水膜区域, 水膜下部有支撑结构并与水库相连。当大气中的水分与水膜表面接触时, 会快速蒸发, 吸收大量热量并降低温度。随着温度的降低, 水蒸气在水膜表面凝结为水滴, 然后滴落到下方的收集桶中。拉舍尔网具有减轻干旱地区水资源短缺问题, 实现持续供水的显著优点, 并且适用性较广, 可以在各种气候条件下实现应用[15]。但是, 该技术成本高, 需要较大的空间。

2.2. 集雾器设计

大气集雾器会接触到大气中的水蒸汽, 需要选用耐候性和抗化学腐蚀的材料, 例如不锈钢、耐酸碱塑料等。大气集雾器的结构应该符合大气水汽运动规律, 同时考虑空间利用率和材料损耗等因素。大气集雾器需要耗费一定能源, 应该优先考虑使用节能型电器或者结合太阳能等可再生能源, 减少能源消耗。

雾水收集系统是利用材料作为风致雾的屏障, 进而通过风中的雾与材料接触收集水分。尽管空气与雾收集装置发生碰撞, 但它无法捕获雾中包含的所有液态水[16] [17]。这是由于: 1) 雾可通过雾水收集器周围; 2) 雾可穿过筛网开口; 3) 网可弹回气流中的液滴。

研究雾水收集装置效率具有重要意义。捕获的水滴合并后通过重力作用移动至雾收集系统底部, 并收集至水箱。在雾水收集与移动过程中水可通过蒸发等作用再次返回到气流中, 降低了雾收集效率。影响雾收集的效率的因素主要有风速、雾含水量、液滴尺寸分布和网格特性, 基于此, 可通过方程(1)计算集雾器的集水器效率 η_{coll} [18]。

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{W_{\text{coll}}}{v_o LWC} \quad (1)$$

式中, W_{coll} (kg/s/m^2) 为每单位筛网面积的水流量, v_o (m/s) 是入射雾/气流的未扰动风速, LWC (kg/m^3) 是

入射雾或气流的液态水含量。

Rivera [18]等人研究表明, 集水效率可通过考虑以下条件来表达收集效率: 1) 空气动力学收集效率 η_{AC} , 基于将与雾网碰撞的未受扰动雾滴的数量计算。2) 捕获效率 η_{capt} , 拦截液滴实际被材料捕获的部分。3) 排水效率 η_{dr} , 由排水沟收集的筛网捕获的水的比例。

$$\eta_{coll} = \eta_{capt} \eta_{dr} \eta_{AC} \quad (2)$$

在使用捕雾集水材料之前, 评估其实用性具有重要现实意义。研究表明, 通过干湿温度、相对湿度、风向和风速以及露点温度计算大气水蒸汽压、饱和蒸汽压和大气绝对湿度, 之后通过使用方程(3)预测的集雾系统的可行性:

$$\begin{aligned} RH > 69\%, WH_3 &= (3 \times M_t \times U_z \times \eta_{coll} \times 3.6) \\ RH < 69\%, WH_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 RH 是气象站测量的相对湿度, WH 是潜在的收获水量(L/m²/天), 下标 3 表示每 3 小时一次, U₂ 是地面以上 2 米高度处的风速, M_t 是绝对湿度, 其定义为特定温度下以 g/cm³ 空气为单位的湿度。通过研究了八个不同风向的风速值, 结果表明, 通过雾水收集装置可捕获大量空气中的水, 潜在收集水量分别为 6.7 L/m²/天和 156.3 L/m²/天。

2.3. 网格拓扑研究

为了提高集雾器的性能, 研究不同网格半径直径的集雾效率具有重要意义。通常, 网格纤维半径 R 和纤维的半间距 D 对于计算收集器效率的斯托克斯系数具有重要意义, 斯托克斯数决定潮湿空气的惯性及其在流线上的迁移, 从而表明集雾器设计的有效性, 因此较大的斯托克斯数表明雾水收集速率较高[19]。Rivera [18]研究了空气动力学收集效率, 结果表明网状物的两个重要特征是阴影系数和用于编织或编织网状物的纤维的特征, 叠加模型结果表明可以通过在雾水收集器中引入凹面形状并改善网状纤维的空气动力学提高收集效率。

2.4. 表面润湿性

表面润湿性是指液体在固体表面上展开的倾向程度, 是液体与固体界面之间的相互作用力[20] [21]。在大气集水过程中, 表面润湿性对于拉舍尔网的效率和水收集量具有重要影响。通常情况下, 越容易在固体表面展开的液体, 其表面润湿性就越强。对于拉舍尔网, 使用具有更高表面润湿性的材料可以有效吸附集水。

Park 等人[22]研究了表面润湿性、长度尺度和编织密度对编织网格捕雾能力的影响, 利用模型结合雾水收集器的流体动力学和表面润湿性预测雾收集效率。结果表明, 收集的液滴再蒸发与筛网开口堵塞严重影响雾收集效率。因此, 调整表面润湿性、减小导线的半径和优化导线间距可提高雾收集效率。此外, 利用改性法赋予材料亲水性可进一步提高雾收集效率。

2.5. 仿生雾水采集

近年来, 已制备出许多仿生大气集水材料与装置。我们团队[23]受贻贝的成分和豪猪鱼的表面结构的启发, 合成了一种 Janus 雾采铜泡沫(CF), 其包含经济的聚多巴胺(PDA)类成分涂层(单宁酸-氨基丙基三乙氧基硅烷, TA-APTES)和豪猪鱼类结构疏水材料[具有四足形 ZnO 的聚二甲基硅氧烷(PDMS)], Janus CF 复合材料的优点在于它们具有不对称和协同的交替润湿性加快了雾的收获, Janus CF 复合材料表现出优异的机械耐久性和抗紫外线性能。应用实验表明, 由于非对称润湿性和协同交替润湿性, Janus CF 的雾

收集速率为 $1.70 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

Feng 等人[24]通过学习多种生物的特征设计并优化光滑表面上的超亲水图案, 这种图案化的光滑超亲水表面能够通过超亲水阵列有效地使水滴成核, 以楔形结构和光滑特征促进液滴的聚结和递送, 并以类似耳形肾的结构减少收集屏障。自发采水系统的集水效率为 $2166 \pm 71 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 与光滑表面相比提高了 139%。

3. 露水收集

在雾水收集, 当雾滴撞击材料表面并与材料相互作用时, 可收集雾水。然而, 气候条件限制了从雾中收集水, 大雾天气主要取决于地理和气候因素, 因此难以规模推广[25]。水蒸气存在于全部地区, 因此, 通过冷凝作用可在任何地区获取淡水, 然而, 冷凝过程在热力学上比收集雾复杂, 该过程涉及大量的热量释放[26]。

由于水蒸气在低于露点温度的温度下在表面凝结而形成的水滴称为露水, 露水收集过程分为三类:

1) 被动(辐射)冷却冷凝器, 2) 太阳能再生干燥剂和 3) 使用主动冷却冷凝技术从空气中收集水[27]。

受早晨植物上露水形成的启发, 露水的形成是由材料表面的辐射现象驱动产生, 露水形成是物理过程, 由没有额外能量致使表面冷却, 因此露水形成最重要的因素是冷凝器输出辐射功率和天空辐射功率 P 之间的功率梯度, 由方程(4)中的 Stefan-Boltzmann 方程表示[28]:

$$P = \varepsilon \sigma (T)^4 \quad (4)$$

单位面积的辐射功率 $P(\text{W/m}^2)$ 取决于局部表面温度 $T(\text{K})$ 。在方程(4)中, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数 ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$), ε 是表面的发射率。因此, 为了提高露水形成速率, 采用以下方法提高露水收集效率: 1) 提高表面的红外波长发射特性, 促进夜间的表面冷却效率; 2) 增加冷凝表面的反射率, 降低材料表面捕获热量; 3) 通过倾斜冷凝器表面减少风对冷凝器的影响; 4) 增加表面的亲水性; 5) 减少冷凝表面的热惯性, 促进温差的变化并避免热量从地面传递。

在被动系统中, 冷凝器表面和气流之间的自然对流会降低露水形成效率, 这是由于自然对流降低了冷凝器的冷凝效率。因此, 中空形式的冷凝器(如漏斗)将减少沿表面的自由对流, 较重的冷空气都将由于重力而留在漏斗的底部。

4. 结论

本文对大气中的雾和露水可持续集水方法进行了全面综述, 并提出了解决水资源短缺问题的新途径。总结了大气集水系统中集雾器设计、网格拓扑研究、表面润湿性、仿生合成等技术手段以及改进效率的技术。通过与露水收集进行了对比, 将露水收集系统分为三类, 利用这些系统开发成本低廉、可以利用当地材料制造、无论湿度水平或地理位置如何都能产生水的大气集水器。通过不断改进、创新, 大气中的雾和露水可持续集水方法将会成为解决水资源短缺问题的重要手段。同时, 为推动可持续利用大气中雾和露水提供理论基础和实践指导。

基金项目

陕西省重点研发计划(2022NY-082), 中央高校基本科研业务费资助项目(300102292504), 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY-YB-2023-23)。

参考文献

[1] 加快水资源保护治理推动流域高质量发展[J]. 环境保护, 2023, 51(5): 19.

- [2] 孙才志, 段兴杰. 黄河流域水资源-能源-粮食系统生态可持续发展能力评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 85-90+96.
- [3] Peleka, J., Diop, C., Foko, R., Daffe, M. and Fall, M. (2021) Health Risk Assessment of Trace Metals in Drinking Water Consumed in Dakar, Senegal. *Journal of Water Resource and Protection*, **13**, 915-930. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.1312049>
- [4] Chen, L.-H., Li, P.-C., Lin, Y.P., et al. (2021) Establishing a Quantification Process for Nexus Repercussions to Mitigate Environmental Impacts in a Water-Energy Interdependency Network. *Resources, Conservation and Recycling*, **171**, Article ID: 105628. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105628>
- [5] 魏明辉, 张远, 郑天尧. 液化天然气(LNG)在海水淡化技术中的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 219-222. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20221214.005>
- [6] 李福林, 张其坤, 陈华伟, 王开然, 孙婷婷, 王志宁, 梁恒, 白朗明, 谷东起, 孙永根. 地下取水系统在海水淡化工程中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 399-413.
- [7] 武恩宇, 钱国栋, 李斌. 铝基金属-有机框架材料的水吸附性能与大气集水应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1): 186-192.
- [8] 李雪, 王艳君, 王玉超, 陶胜洋. 仿生表面用于雾水收集的最新研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2486-2503.
- [9] Shen, H.F. and Guo, F. (2019) Tritiated Water Uptake (HTO) and Loss in Maize Plant after Short-Term Exposure of Atmospheric HTO Vapor at Daytime and Nighttime. *Applied Radiation and Isotopes*, **154**, Article ID: 108905. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108905>
- [10] Wu, Q., Su, W., Li, Q., et al. (2021) Enabling Continuous and Improved Solar-Driven Atmospheric Water Harvesting with Ti₃C₂-Incorporated Metal-Organic Framework Monoliths. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 38906-38915. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c10536>
- [11] Gerasopoulos, K., Luedeman, W.L., et al. (2018) Effects of Engineered Wettability on the Efficiency of Dew Collection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 4066-4076. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16379>
- [12] Jacobs, A.F.G., Heusinkveld, B.G. and Berkowicz, S.M. (2008) Passive Dew Collection in a Grassland Area, The Netherlands. *Atmospheric Research*, **87**, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.06.007>
- [13] 李锐, 王立达, 孙文, 舒向泉, 贺永鹏, 刘贵昌. 超疏水不锈钢网的制备及其雾水收集性能研究[J]. 现代化工, 2020, 40(11): 92-97.
- [14] Feld, S.I., Spencer, B.R. and Bolton, S.M. (2016) Improved Fog Collection Using Turf Reinforcement Mats. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, **2**, Article ID: 04016002. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000811>
- [15] Rivera, J. and Lopez-Garcia, D. (2015) Mechanical Characteristics of Raschel Mesh and Their Application to the Design of Large Fog Collectors. *Atmospheric Research*, **151**, 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.011>
- [16] Qi, B., Yang, X. and Wang, X. (2022) Ultraslippery/Hydrophilic Patterned Surfaces for Efficient Fog Harvest. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **640**, Article ID: 128398. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128398>
- [17] Pawar, N.R., Jain, S.S. and God, S.R. (2017) Experimental Study of Fog Water Harvesting by Stainless Steel Mesh. *International Journal of Scientific and Technology Research*, **6**, 94-101.
- [18] Rivera, J. (2011) Aerodynamic Collection Efficiency of Fog Water Collectors. *Atmospheric Research*, **102**, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.005>
- [19] Schemenauer, R.S. and Joe, P.I. (1989) The Collection Efficiency of a Massive Fog Collector. *Atmospheric Research*, **24**, 53-69. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(89\)90036-7](https://doi.org/10.1016/0169-8095(89)90036-7)
- [20] 刘吟松, 帅长庚, 陆刚, 杨雪, 汪鑫. 不同表面润湿性水润滑材料的摩擦特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7): 111-120.
- [21] 胡丹, 未碧贵, 郭小龙. 水处理滤料表面润湿性及表面自由能与其亲油亲水性关系的研究[J]. 广东化工, 2017, 44(3): 68-70.
- [22] Park, K.-C., Chhatre, S.S., Srinivasan, S., et al. (2013) Optimal Design of Permeable Fibernetwork Structures for Fog Harvesting. *Langmuir*, **29**, 13269-13277. <https://doi.org/10.1021/la402409f>
- [23] Yang, C.X., Wang, J., Li, J., et al. (2023) Multibioinspired Design of a Durable Janus Copper Foam with Asymmetric and Cooperative Alternating Wettability for Efficient Fog Harvesting. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11**, 3147-3159. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00376>
- [24] Feng, R., Song, F., Xu, C., et al. (2021) A Quadruple-Biomimetic Surface for Spontaneous and Efficient Fog Harvesting. *Chemical Engineering Journal*, **422**, Article ID: 130119. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130119>
- [25] 张世彤. 基于活性炭纤维的吸附式大气集水研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2022.

-
- [26] 尹梦聪. 冷凝热回收系统的 COP 及效益研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.
- [27] Kandeal, A.W., Joseph, A., Elsharkawy, M., *et al.* (2022) Research Progress on Recent Technologies of Water Harvesting from Atmospheric air: A Detailed Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **52**, Article ID: 102000. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102000>
- [28] Beysens, D., Brogini, F., Milimouk-Melnychouk, I., Ouazzani, J. and Tixier, N. (2012) Dew Architectures—Dew Announces the Good Weather. *Matérialités Contemporaines = Materiality in Its Contemporary Forms: Architecture, Perception, Fabrication, Conception. MC 2012 Symposium*, Villefontaine, November 2012, 282-290.