

# 基于热交换和集水仿生原理的作物蒸散凝结灌溉技术

龚道枝<sup>1,2</sup>, 郝卫平<sup>1</sup>, 梅旭荣<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081;

2. 清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 根据作物蒸散、热交换、水气凝结、集水仿生学和节水灌溉的原理, 系统提出一项农业节水新途径——作物蒸散凝结灌溉。通过创造低温凝结条件, 聚集、冷凝作物蒸散发的湿热水气并高效收集, 最后回灌到土壤中供根系吸收, 如此循环往复, 形成闭合的土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水分微循环。蒸散水气凝结和收集效率, 水气回收率、能耗效率是衡量该项技术的关键参数。该技术适合严重缺水但新能源丰富的干旱、半干旱地区, 实施方式分温室地源热泵型、空调除湿型和大田仿生集水型 3 种类型。未来技术研发重点在于高效集水仿生材料的突破和系统结构与运行流程的优化。

**关键词:** 蒸发, 水气, 凝结, 集水仿生学, 水分回收率, 能耗效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.002

中图分类号: S275

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0008-05

龚道枝, 郝卫平, 梅旭荣. 基于热交换和集水仿生原理的作物蒸散凝结灌溉技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 8—12.

Gong Daozhi, Hao Weiping, Mei Xurong. Condensing evapotranspiration for irrigation based on heat exchange and bionics for collecting liquid water[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 8—12. (in Chinese with English abstract)

## 0 技术背景

在过去的农业节水技术研究中, 一方面是采用管道和防渗渠道高效输送灌溉水, 减少输水过程中的损失, 提高输水效率; 一方面是利用喷微灌、精细地面灌溉技术以及覆盖、耕作农艺技术, 充分利用农田降水和灌溉水, 减少非生产性水分损失, 提高水分利用率; 再是利用植物的遗传特性和水分生理机制, 培育、筛选和布局抗旱节水品种, 优化调控作物水分生产过程, 最大限度提高作物水分利用效率<sup>[1]</sup>。这些研究均忽视了一个重要的环节, 就是对作物蒸散水气的回收利用。

近年来, 国内外学者对作物蒸散发水气回收利用技术进行了尝试性的研究。Guillermo 等构建了 Watergy 系统, 通过高大的冷凝管道系统循环凝结湿热水气, 在密闭温室内实现了能量和水分的循环利用<sup>[2]</sup>。Jenny 等结合太阳能咸水淡化装置和灌溉系统提出了劣质水凝结灌溉技术, 通过太阳能分馏室蒸发咸水, 将湿热空气通入地下管道系统冷凝成淡水, 经过管道小孔渗入土壤中供作物根系吸收利用, 是一项有前景的咸水替代灌溉技术<sup>[3]</sup>。但该技术未考虑到利用作物蒸散发产生湿热水气的凝结灌溉利用。这些研究均局限在密闭温室内, 也未考虑凝

结作物蒸散水气就地灌溉利用。以色列科学家发明了可直接放在开放环境中的 WatAir 装置, 凝结少量作物蒸散水气供应干旱地区饮用水。综合上述研究表明, 通过采用一定技术手段, 建立水气凝结条件, 循环利用作物蒸散水分, 提高水分利用率和利用效率, 技术上完全可行。

因此, 有必要在总结过去对农田蒸散过程、水热交换原理、水气凝集机理、集水仿生学、节水灌溉原理等研究的基础上, 从农田水分循环过程控制的角度, 系统提出一种崭新的农田节水调控思路——作物蒸散凝结灌溉, 将大幅度提高水分利用率和利用效率, 同时循环利用能量, 将极大地促进水资源严重紧缺但太阳能、风能等新能源丰富的干旱、半干旱地区的农业生产快速发展<sup>[4]</sup>。

## 1 技术原理和关键参数

作物蒸散凝结灌溉 (condensing evapotranspiration for irrigation, CEI) 是依据农田作物蒸散 90% 以上的水分未参与代谢的机制, 借助风机和管道循环系统聚集湿热水气, 创造低温条件和凝结面/凝结核, 将水气冷凝成液态水并高效富集, 最后又经灌溉系统回灌到土壤中供作物根系吸收, 如此循环往复, 整体上构成闭合的 SPAC 水分微循环系统, 大幅度提高水分利用率和利用效率 (图 1)。其概念突破了传统的农业节水思路, 实现了水分的多次循环利用, 形成了真正意义上的农田水分微循环。技术的关键在于水气凝结条件的建立和液态水的收集, 即如何将湿热水气的热能带走, 并借助低温的凝结面/凝结核, 将冷凝的液态水富集起来。

蒸散水气凝结和收集效率, 水气的回收率及能耗效率是衡量该项技术效果的关键参数。蒸散水气凝结效率

收稿日期: 2010-09-17 修订日期: 2010-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50709040, 30871447); 教育部优博基金专项 (200965); 中央基本科研业务费项目 (BSRF200901)

作者简介: 龚道枝 (1976—), 湖南澧县人, 博士, 副研究员, 中国农业工程学会会员 (E040100021M), 主要从事农业节水研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: gongdz@ieda.org.cn.

\*通讯作者: 梅旭荣 (1963—), 山东莱州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水资源与水环境研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: meixr@ieda.org.cn

是指借助低温条件，空气水气转化为液态水的比例，而收集效率是指系统收集到的凝结水占凝结过程中产生液态水的比重。水气回收率就是指系统收集到凝结水占作物总蒸散发的比重。能耗效率指系统消耗单位能量所收集到的液态水量。

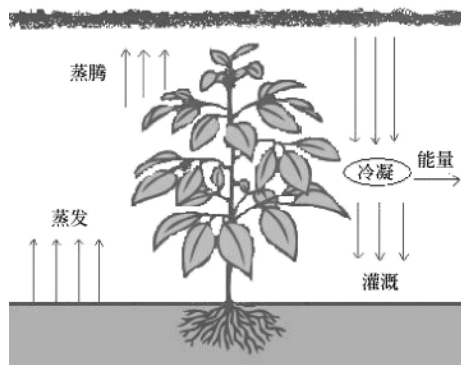


图 1 作物蒸散凝结灌溉技术原理

Fig.1 Principles of condensing evapotranspiration for irrigation (CEI)

## 2. 技术理论基础

作物蒸散凝结灌溉技术具有坚实的理论基础，主要包括农田蒸散原理、水热交换原理、水气凝结机理、集水仿生学和节水灌溉原理。

**作物蒸腾原理。**植物吸收的水分，只有小部分用于自身代谢和组成，绝大部分经叶片蒸腾散失到体外。说明存在大部分作物蒸腾和土壤蒸发水分可循环利用。

**热交换原理。**通过冷媒/空气热交换器内冷媒的蒸发将空气循环所携带热量吸收至冷媒中，在冷媒循环的同时再通过冷媒/水热交换器内冷媒冷凝，将冷媒中所携带热量吸收，最终通过能换热系统转移至低温物质中。

**水气凝结机制。**一定温度下空气中能容纳的水气量是有限的。当空气水气量超过饱和时，如果温度高于零摄氏度，多余的水气会析出凝结成水滴。饱和状态下空气中所能容纳的最大水气量与温度的高低密切相关，在同样体积的空气里，温度高时所能容纳的水气量要比温度低时要大。在一般情况下，大气中水气的过饱和以及水滴的形成大都是由空气冷却引起的。空气变冷和凝结核是空气中发生凝结过程的主要条件。实际上只要能提供低温粗糙面、多空结构、网状结构，就能高效凝结水气。如金属网、沙石、纳米纤维网等。

**集水仿生学原理。**蜘蛛网能以很高的效率从潮湿空气中收集水滴，收集能力取决于“湿后重构”功能<sup>[5]</sup>。类似的，昆虫翅膀、植物绒毛等也能高效地吸附和收集水滴。构造类似蜘蛛网、昆虫翅膀、植物绒毛等生物特殊结构，模仿对水特殊浸润和聚集的生物表面，大规模设计和生产具有特殊浸润性和富集水滴特性的纳米纤维网，可供缺水地区收集空气液态水。

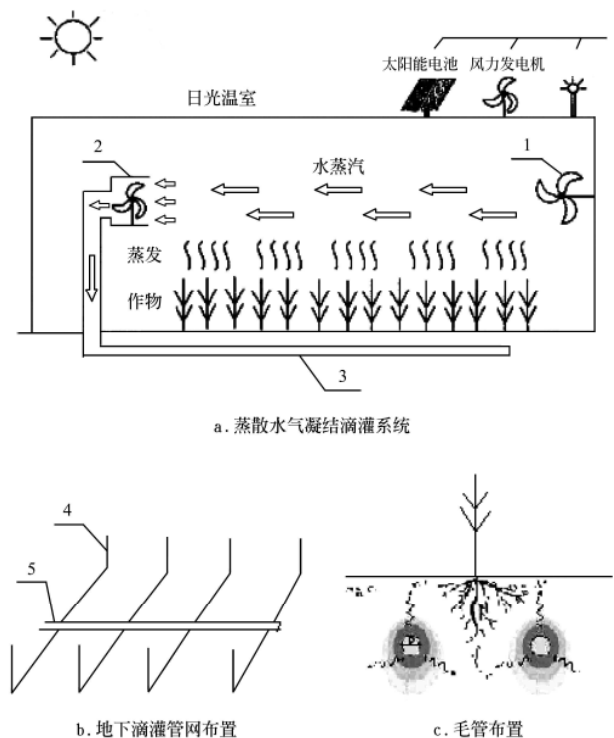
**节水灌溉原理。**依据作物需水信号和临界阈值，借助灌溉系统，基于作物生育期水分生理和生产特性，适时适量地供给水分，达到节水、高产、高效的目的。

## 3 技术模式、效果和适用条件

作物蒸散凝结灌溉技术模式可分为温室地源热泵型、温室空调除湿型和大田仿生集水型。

日光温室、大棚是该项技术实施的理想场所，因为它们提供了密闭的环境，能高效地聚集湿热水气。可以借助低温物质（夏季的土壤、冬季的空气或者液态水等）来降低温室作物散发的湿热水气温度，同时构造较大的接触面富集水气凝结形成的液态水。经水热传导模型理论计算，该类型的水气回收率在 30% 以上，与温室结构、风机功率、接触面大小、接触面-水气温差和管道热传导系数等因素有关。目前就可以在干旱半干旱地区大范围应用推广，技术上完全可行，只需要对系统结构和运行工况参数进一步进行优化，以极大地提高节水节能效果。

1) 温室地源热泵型 在炎热的季节或光照强烈的中午，由于作物蒸腾作用和温室效应，温室温度可达到 30~50℃ 甚至更高，湿度可接近饱和状态，利用风机或风扇将湿热的空气吹入到预埋在低温（比空气低 10~30℃）土壤中的管道，就可以凝聚水滴并通过管道的渗水孔渗入土壤中供作物根系吸收，如此循环往复，这种运行方式就叫温室作物蒸散凝结地下滴灌（如图 2）。系统运行的动力可来自太阳能、风能发电。晚上还可以利用系统反向运行对温室空气加温、土壤降温储冷，为第二天白天凝结水气做准备。实际上，也可以利用温室对劣质水分馏后灌溉，首先进行蒸发产生湿热空气，然后采用上述运行方式凝结水气进行大田灌溉（如图 3）<sup>[3]</sup>。可以用来蒸馏净化海水、咸水等劣质水，用于灌溉大田作物。



1. 风扇 2. 进气管 3. 地下滴灌干管 4. 排气管 5. 地下滴灌支管

图 2 温室作物蒸腾水气凝结地下滴灌系统

Fig.2 Condensing crop transpiration for subsurface irrigation in greenhouse

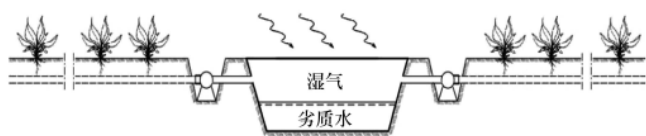


图3 劣质水蒸馏地下滴灌系统

Fig.3 Underground condensation of humid air and subsurface irrigation for low quality water treatment

2) 温室空调除湿型 如图4所示<sup>[6]</sup>, 基于空调的原

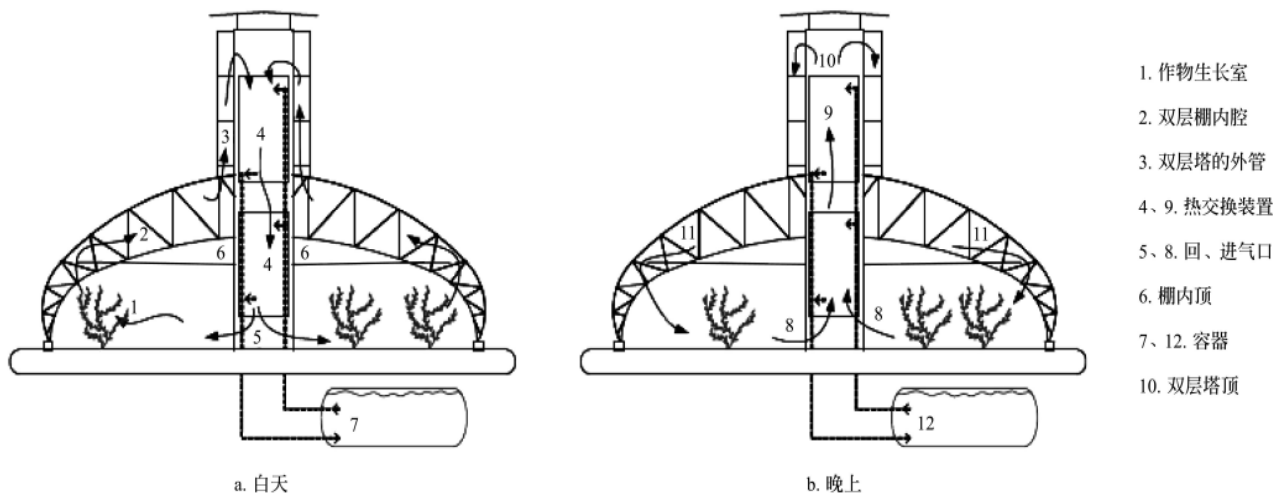


图4 基于空调除湿原理的温室作物蒸散灌溉系统

Fig.4 Conditioner-based greenhouse for crop water cycle

3) 大田仿生集水型 利用太阳能、风能、核能等低碳能源驱动风机, 抽取高空低温空气或地下水提供凝结条件, 在大田上方或附近构造大面积仿生纳米纤维网收集凝结水, 净化处理后用于作物灌溉。理论计算水气回收效率在 25% 以上。这是一项最具有应用前景的农业节水技术。

#### 4 技术发展现状和应用前景

在生产中大规模应用作物蒸散凝结灌溉技术, 过去几乎不太可能, 尤其是在大田作物上。近年来随着农田作物蒸散原理、热交换原理、水气凝结机理、集水仿生学原理和精细灌溉控制原理的阐明以及现代纳米材料、新能源技术的快速发展, 实现作物蒸散凝结灌溉已成为可能。目前, 温室作物蒸散凝结灌溉技术已经实现。

现代浅层地热交换和空调除湿技术的飞速发展, 为实现温室作物凝结灌溉技术提供了理论基础和物质条件。Jenny 等结合太阳能分馏室和地下滴灌系统提出了凝结灌溉系统, 可以将劣质水通过分馏室蒸发形成湿热空气, 再借助风机通入预埋在土壤中的滴灌管道凝结成液态水渗入作物根区, 实现劣质水的资源化利用。同时, 他还通过模拟土壤和管道中的水热运动, 对湿热空气-土壤的温差、滴灌管道间距与凝结水量之间的关系进行了系统研究, 给出了最优的管道间距和系统启动时分馏室湿热空气的适宜温度<sup>[3]</sup>。德国 Guillermo 等基于空调除湿原理发明了 Watergy 系统 (图5), 能实现 70% 灌溉水的循环利用, 同时只需较低的能耗<sup>[2]</sup>。Speetjens 等对该系统的控

理, 白天抽取温室湿热空气, 利用冷媒和压缩机, 对湿热空气进行吸热降温处理并将热能储存下来, 同时将低温饱和态的空气通过大面积低温金属管富集液态水, 经灌溉系统回灌到土壤中; 晚上, 将系统进行反向运行, 加热空气和储存冷量, 为第二天白天工作准备; 如此循环往复。该运行方式, 日水气回收效率极高, 可以达到 40%~70%, 但技术成本和运行成本相对较高, 适合极端缺水地区的蔬菜作物生产。

制参数进行模拟研究, 优化了系统的运行工况。这些研究基本阐明了温室作物凝结灌溉技术原理和应用效果<sup>[5]</sup>。

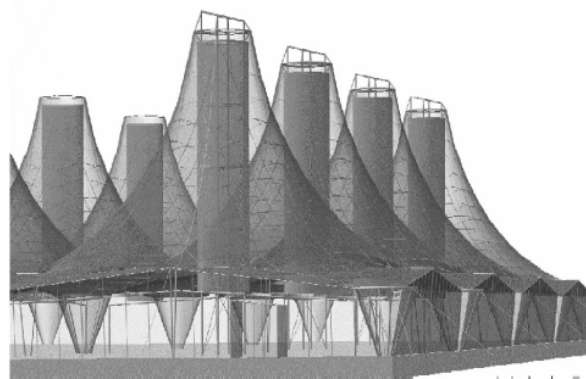


图5 温室作物蒸散水循环系统

Fig.5 Watergy system

基于仿生原理的富集凝结收集水分技术和产品不断涌现, 使大田作物凝结灌溉技术的实现成为可能。纳米比亚水文中心大楼, 采用仿生学原理, 安装了一种能在干旱地区为大楼收集足够水供自身使用的装置, 利用网眼稠密的特殊丝网收集湿气, 一旦网眼里水分达到饱和, 多余水分就沿着水槽流入储水罐。水流走后网眼排空, 继续捕捉到更多的水分。以色列 Joseph Cory 和 Eyal Malka 基于树叶收集露水的特性, 同样采用仿生学原理发明了一种用特殊板材做成倒金字塔形的简易装置 WatAir, 可在几乎任何气候条件下从空气中收集凝结水并转化为淡水 (图6)<sup>[7]</sup>。一套面积为 29.3 m<sup>2</sup> 的装置每天

可从空气中提取至少 48 L 淡水。只要采集器的数量足够多,即使在偏远和受到污染的地区也能每天无限量地供应淡水。智利在地处沙漠边缘的丘恩贡果村建造了截雾取水工程,包括一片截雾的网阵和一个水处理厂。模仿蛛网织造每张面积 48 m<sup>2</sup> 细网,并排成网阵,使穿行其间浓雾反复被拦截。吸水性较强的纤维浸满水分后,水滴开始自上而下顺网面汇聚到网下流槽里,经管道输送到水处理厂,通过过滤、净化就成了新水源。该项工程平均每天可供水 10 580 L, 每天每户村民可得到 120 L 生活用水。

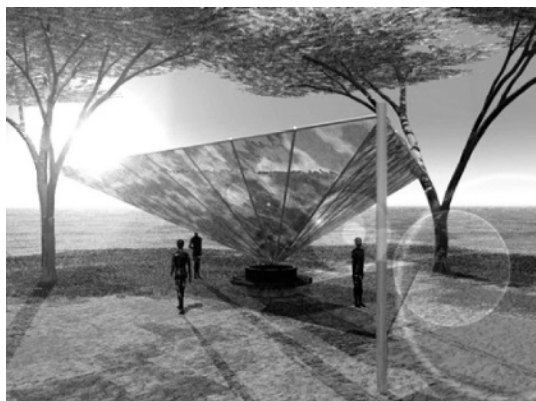


图 6 空气水汽收集装置  
Fig.6 WatAir system

实现大田作物蒸散凝结灌溉必须具备两个重要基础条件,生物表面特殊浸润、聚集水机理的阐明和纳米集水新材料的创制成功。目前,这两个方面的研究已经取得重大突破,相关成果已经发表在国际顶尖杂志 *Nature* 上。研究发现蜘蛛丝遇到湿润空气会发生结构重构,形成表面压力梯度,利于水滴的富集,并初步构建人造仿蜘蛛丝纳米纤维网,实现了小尺度液滴的方向性驱动<sup>[5]</sup>。德国科学家同样依据仿生学原理,利用纳米纤维网建立小型的集水装置,取得明显的效果(图 7、8)<sup>[8]</sup>。这些结果表明,可以设计人造纳米纤维网收集湿润空气、雾气中的水滴,实现大田作物蒸散凝结灌溉,理论上应当可行,下一步研究重点在于聚集凝结水的材料规模化生产以及如何高效组建系统和优化结构、运行参数。这些问题一旦得到很好解决,在大田作物上大面积推广也就指日可待,必然会带来节水农业技术重大进步。

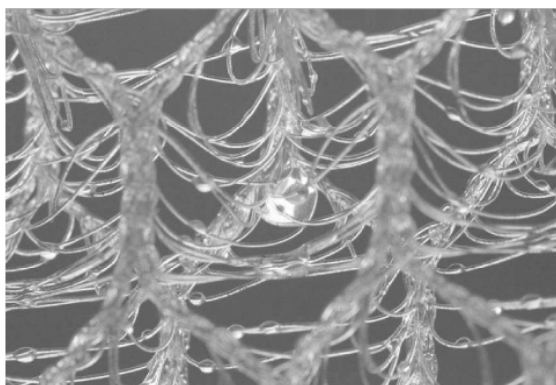


图 7 基于纤维网的凝结水收集器的集水表现  
Fig.7 Fiber-based fog collector with adhered water droplet

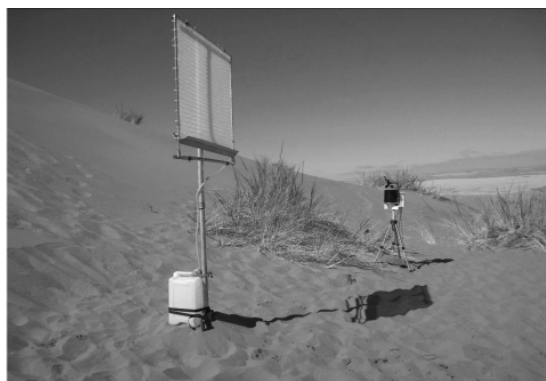


图 8 基于仿生纤维网集水装置试验  
Fig.8 Field trials of collector at desert station

作物蒸散凝结灌溉技术成本虽然比较高,需要创造低温条件和凝结面,且在收集水气过程需要消耗一定的能量,但还是能广泛用于严重缺水的干旱、半干旱地区。因为严重缺水地区的太阳能、风能资源丰富,可以提供廉价的新能源,且在该地区获取水资源的其他技术成本也非常高。同时,还可以通过优化系统结构和运行参数,降低技术应用成本。因此,该项技术在干旱、半干旱地区具有广阔的应用前景。

## 5 未来技术发展方向和研发重点

如果大规模应用作物蒸散水气凝结灌溉技术,将会明显缓解世界缺水问题。但是,该项技术的产业化开发和大规模推广,还有较长的一段路要走,并且必须紧紧围绕应用基础理论、核心关键技术与产品、技术标准化模式与应用分区以及技术效益与环境影响评价等方面进行重点研究。

1) 作物蒸散凝结灌溉技术的应用基础理论研究。对仿生学集水机理的揭示,将为特殊材料和结构的开发提供理论依据,因此必须加快对集水仿生物结构、浸润特性的研究。以水气回收效率和能耗效率为目标,利用运筹学和系统控制论,对系统结构与流程的优化并融合智能控制模型进行研究是非常必要的,将会极大地降低技术成本和运行成本,提高技术经济效益。

2) 作物蒸散凝结灌溉的核心关键技术与产品的研发。基于仿生学原理的集水材料和装置是大田作物蒸散凝结灌溉技术的核心关键技术。集水材料、装置的突破,将使大田作物蒸散凝结灌溉技术成为现实,会大幅度提高水气回收效率和作物水分生产力。同时,高效的热交换系统和节能风机的研发,有助于提高水气凝结和能量利用效率,降低技术应用成本。

3) 技术标准化模式和分区研究。根据中国气候资源的分布特点,开发典型的技术应用模式和标准,并对适宜地区进行分区,做到因地制宜,提高技术应用效果。

4) 技术效益评估和环境影响评价。综合考虑技术的经济效益、社会效益和生态效益,必须先将干旱半干旱地区水资源生态和经济价值纳入技术和环境的收益,再对技术进行效益和环境影响评价。有必要结合陆地地表过程模型和区域气候模式,评价和研究当该项技术大规模

模应用后, 是否造成对局地天气系统的影响。

## 6 结 论

作物蒸散凝结灌溉技术由于突破了传统的农业节水思路, 具有其他技术无法比拟的优势, 随着全球水资源短缺问题日益突出, 必将被逐步重视并实践。尤其, 在干旱和半干旱地区发展作物凝结灌溉技术, 循环高效利用水分资源, 对保护生态环境和发展农业生产具有重要意义, 是一项十分具有发展前景的技术成果。

实现作物蒸散凝结灌溉无论是在密闭的温室, 还是在敞开的大田, 技术和经济上可行, 且节水效果和经济效益非常可观。随着现代新材料和智能控制技术的应用, 尤其是随着亲水性强的纳米仿生集水材料和装置的突破, 作物凝结灌溉技术将会向规模化和产业化方向发展。

然而, 当前大田作物蒸散凝结灌溉技术存在的问题还比较多, 非常复杂, 是一项系统工程, 需要进行多学科交叉联合攻关。随着各方面问题的彻底解决, 作物蒸散凝结灌溉技术必将成为农业节水技术研究领域中的热点, 也会给干旱半干旱地区农业发展带来新希望。

### [参 考 文 献]

[1] 山仑, 康绍忠, 吴普特. 中国节水农业[M]. 北京: 中国

农业出版社, 2004.

- [2] Guillermo Zaragoza, Martin Buchholz, Patrick Jochum, et al. Watery project: Towards a rational use of water in greenhouse agriculture and sustainable architecture[J]. Desalination, 2007, 211(1/2/3): 296—303.
- [3] Jenny Lindblom, Bo Nordell. Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation[J]. Desalination, 2007, 203(1/2/3): 417—434.
- [4] 龚道枝, 梅旭荣. 关于在我国开展作物蒸散凝结灌溉技术研究的建议[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 18.
- [5] Zheng Yongmei, Bai Hao, Huang Zhongbing, et al. Directional water collection on wetted spider silk[J]. Nature, 2010, 463(7281): 640—643.
- [6] Speetjens S L, Stigter J D, van Straten G. Physics-based model for a water-saving greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 149—159.
- [7] Lee Evelyn. WatAir: Turning Air into Water. <http://inhabitat.com/watair-turning-air-into-water/2007-04-16>.
- [8] Jamal Sarsour, Thomas Stegmaier, Dipl.-Ing. Michael Linke, et al. Bionic development of textile materials for harvesting water from fog[C]. 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. Münster, Germany, 25–30 July 2010. pp 1—4.

# Condensing evapotranspiration for irrigation based on heat exchange and bionics for collecting liquid water

Gong Daozhi<sup>1,2</sup>, Hao Weiping<sup>1</sup>, Mei Xurong<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Beijing 10084, China)

**Abstract:** Based on the principles of crop evapotranspiration, heat exchange, vapor condensation, bionics for collecting liquid water, and water-saving irrigation, an innovative solution to improving crop water use efficiency: condensing evapotranspiration for irrigation (CEI) was summed up systematically. Low-temperature condition is created to aggregate, condense and harvest evapotranspiration vapor, and then irrigates the soil for root absorption, thus a totally closed water micro-circulation of soil-plant-atmosphere-continuum forms. Condensation and collection efficiency of evapotranspiration vapor, and energy use efficiency are key parameters of the technology. The technology is suitable for a serious water shortage, but energy-rich arid and semi-arid areas. The implementing patterns of this technology are divided into three types, such as condensing vapor by heat exchange between shallow soil and air, conditioner-based dehumidifier in greenhouses and collecting air water by bionics net in open-fields. The key points and directions to be solved in the future are breakthrough of bionics for collecting water, and optimization of system structure and operation process.

**Key words:** evapotranspiration, vapor, condensation, bionics for collecting water, water recycle ratio, energy use efficiency