

荒漠植物凝结水形成机制研究进展

刘涛¹, 徐华君^{2*}, 张永福¹

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘要 系统综述了国内外对凝结水的最新研究进展, 包括凝结水形成机制、生态作用以及冠层凝结水吸收利用。结合荒漠植物的特点及研究现状, 指出加强对荒漠植物吸收冠层凝结水的内在机理研究有助于理解荒漠植物对干旱胁迫的适应, 可为全球变暖背景下的荒漠植物响应对策的阐述提供理论依据。

关键词 荒漠植物; 凝结水; 生态作用

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)35-0067-03

Research Progress on the Formation Mechanism of Condensation Water of Desert Plants

LIU Tao¹, XU Hua-jun^{2*}, ZHANG Yong-fu¹ (1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046; 2. Key Lab of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046)

Abstract Recent research progress of the condensate systematically domestic and overseas were discussed, including the condensate formation mechanism, ecological function and canopy water absorption and utilization. Combined with the characteristics and research status of desert plants were pointed out that it should strengthen desert plants absorb the inner mechanism of the canopy water research, then it will help to understand the desert plants adapt to drought stress, and provide theoretical basis of desert plants response countermeasures under the background of global warming.

Key words Desert plant; Condensation water; Ecological function

干旱区是指多年平均降水量在 200 ~ 250 mm 以下地区的总称^[1-2], 约占全球地表面积的 36%^[3-4], 我国的干旱区占国土面积的 25%^[5]。该类区域的典型特点是地下水位下降, 土壤盐渍化, 物种多样性降低, 植被盖度降低, 甚至退化成荒漠^[6]。干旱荒漠降雨稀少, 且时空分布不均匀, 尤其是在荒漠植物的生长季, 水分往往成为生态系统的非生物限制因子, 任何补充性的水源都能深刻影响生态系统的平衡和稳定^[7]。水汽转为液态的过程称为水汽的凝结, 研究表明, 与极不确定的降水输入相比, 凝结水是干旱荒漠区频发且相对稳定的水资源^[8]。凝结水作为干旱荒漠最重要的非降水补给, 在区域水资源平衡中占据着重要地位^[9]。

凝结水分为广义的凝结水和狭义的凝结水, 广义的凝结水包括露、霜、雾、土壤吸湿水等, 而狭义的凝结水一般是指空气中的水气在地物表面冷凝形成的水分, 按照凝结面的不同, 可分为冠层—大气凝结水和土壤—大气凝结水, 前者的水气来源主要是空气中的水气和植物呼吸作用交换的水气, 后者的水汽来源主要包括空气水气和浅层土壤水, 但是土壤—大气凝结水往往量较小, 仅能在一定程度上润湿土壤, 在下渗之前就被蒸发, 难以通过根部被植物吸收, 因此冠层凝结水是荒漠植物捕获隐匿降水的主要来源^[10-11]。笔者综述了凝结水形成机制研究进展, 并展望了研究方向。

1 凝结水形成机制

凝结水的形成, 是水由气态转为液态的过程, 国外学者首先提出这种状态的转变包括 4 个物理过程: 异相成核、自相似增长、核植入、液滴清除^[12-13]。这种循环发生在特定气候条件下, 如凝结面温度低于露点温度, 近地面相对湿度较

高, 微风^[14]。在半干旱生态系统中, 坡向也同样影响着凝结水的形成过程, 不同的坡向意味着不同的有效辐射量, 进一步影响土壤温度、土壤含水量和凝结持续时间, 从而造成凝结水量在不同坡向之间的差异^[15]。同时, 气候变化也同样影响着凝结水的形成, 在全球变化的背景下气候逐渐变得干热, 当空气湿度低于 71% 时, 凝结水量变少^[16]。

国内学者最先在干旱半干旱区研究了凝结水的形成机制。阎百兴等^[17]在三江平原的研究发现, 沼泽地中冠层的凝结量最多, 地面上的凝结量略低于冠层顶部。张静等^[18]在古尔班通古特沙漠采用微渗计法对比研究了 3 种生物结皮类型(藻结皮、地衣结皮和苔藓结皮)和自然裸沙地对地表凝结水量及凝结水蒸散过程的影响, 发现生物结皮的存在有利于沙漠地表凝结水的形成, 且凝结水量主要受温度、大气湿度、凝结面类型、气象条件和生境等因素的影响。李洪波^[19]在内蒙古毛乌素沙地的研究发现, 冠层凝结水形成能力从大到小依次为臭柏冠层、油蒿冠层、裸地。郭斌等^[20]在塔克拉玛干沙漠的研究认为, 不同下垫面类型土壤的日均凝结水量之间存在极显著差异, 进一步研究发现凝结水量主要受气温、空气相对湿度、地温、风速及下垫面等因素的影响。陶冶等^[21]研究了叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响, 结果发现毛尖的存在有助于齿肋赤藓结皮对凝结水和降水的利用, 增强了藓类结皮对干旱环境的适应能力。

2 凝结水生态作用

国外学者最早对凝结水生态作用进行了描述, 作为干旱区一种稳定持续的水资源输入, 凝结水在维持荒漠生态系统稳定方面具有积极作用, 具体表现在: 凝结水能够促进岩石的风化^[22-23], 积累大气尘埃^[24-25], 润湿沙丘, 对沙丘的稳定有明显的改善作用^[24-26], 加剧半干旱区喀斯特地貌的形成与发展^[25]。

凝结水还是生活在干旱地区的隐花植物、小型动物、昆

作者简介 刘涛(1989—), 男, 新疆巴音郭楞人, 硕士研究生, 研究方向: 地理信息系统及国土信息技术。* 通讯作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 从事人文地理研究。

收稿日期 2017-10-23

虫、生物结皮重要的水分来源,尤其对植物的生长发育具有积极作用,在干旱条件下,凝结水的频繁发生可促进沙漠中一年生植物种子的萌发^[27],缓解植物的缺水状况^[28-29],显著影响荒漠植物的光合作用^[30]和水分关系^[31],减少土壤水分蒸发^[28]。凝结在植物冠层的凝结水有助于植物克服干旱胁迫,帮助它们度过蒸发强烈的干旱季节^[22,28]。

凝结水的发生同样可以促进作物的生长,这是由于凝结水的发生加速叶片对叶面肥和杀虫剂的溶解,促进叶片对它们的吸收^[32-33]。此外,在大气中循环的营养元素可能随着凝结水再次被带入近地层,被土壤或者作物叶片吸收利用。

除此之外,由于凝结水的化学组分反映着空气中污染物种类与形态,凝结水可以作为空气污染的指示器^[34]。凝结水中还可能含有铵态与硝态氮^[35-36],当凝结水蒸发时,铵态与硝态氮也被分解^[37],这是由于浓缩的亚硝酸铵溶液不稳定,能被分解为 N_2 和 H_2O ^[36],能够减轻空气污染程度。水汽冷凝过程中,空气中的污染物通过湿沉降过程被清除,因此凝结水可以在一定程度上净化空气^[36],提高空气质量。

国内对凝结水生态作用的研究多集中在干旱半干旱地区,郑玉龙等^[38]研究发现,凝结水是云南西双版纳云雾林中附生植物的主要水源。庄艳丽等^[39-40]通过模拟不同的凝结水梯度,研究干旱条件下被毛植物雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 的生理生态响应,结果发现,凝结水能够显著提高植株水势、叶片含水量、净光合速率和生物量。潘颜霞等^[41]研究了沙坡头地区土壤吸湿凝结水对土壤生物结皮 (biological soil crust, BSC) 的生态作用,认为土壤吸湿凝结水能够提高该区 BSC 的生长活性,有利于其生物量的积累。

关于凝结水是否能够下渗补充地下水,国内学者也开展了大量研究。余绍文等^[42]在罗布泊北部地区采用称重法模拟了凝结水对地下水的补给,结果发现,凝结水是该地区包气带水分的主要补给来源,补给量占到包气带水分总收入的 50%,但凝结水形成深度较浅,强度弱,加之盐分的吸湿性和晶间细小空隙产生的负压,导致凝结水难以形成连续的渗入补给地下水。与此同时,也有学者认为,凝结水能够少量补充地下水^[43]。周金龙等^[44]研究认为,年凝结水量约占新疆昌吉地区多年平均降水量的 18.7%,提出冬季凝结水的形成增加了积雪量,这些积雪融化后转变为土壤水资源,可以补给浅层地下水;梁永平等^[45]研究显示,鄂尔多斯盆地来自凝结水的白垩系地下水补给量占地下水补给总量的 6%;而在陕北的沙漠,凝结水约占降雨量的 10%,是地下水补给的第二来源^[46]。

3 冠层凝结水吸收利用

国外较早开展了冠层凝结水的吸收利用研究。Stone^[22]首次报道了植物叶片能够吸收利用凝结水,之后这种现象并未得到广泛关注,直到 20 世纪末叶片吸水研究再一次引起注意。已发表的文献表明,在不同生态系统中已经发现有许多植物种存在叶片吸水现象^[31]。其中包括番茄^[47]、*Pinus coulteri*^[48]、*Nolana mollis*^[49]、法国薰衣草、*Crassula species*^[50]、*Juniperus monosperma*^[51]、红树林^[52]、热带山地云雾林^[53-54]。

但是不同生态系统中凝结水在水分平衡中所占的比例不同,在加利福尼亚沿海草原生态系统中,28% ~ 66% 的水分来自叶片吸水^[55],在红树林生态系统中叶片吸水比例也占到 34%^[56],而在以色列南部的荒漠生态系统中 (内盖夫沙漠) 中这一比例更是达到 74%^[57]。以上结果表明,叶片吸收利用凝结水在不同生态系统中存在差异。

Limm 等^[52]在美国加利福尼亚北部红树林中研究发现,蕨类植物 (刺羽耳蕨) 能够吸收夜间冠层截留雾水的 7.2%,处于生态系统中部的吸收能力最大 (超过 10%),而处于该生态系统南部边缘的刺羽耳蕨叶片却几乎不存在雾水吸收的现象,说明叶片吸水现象在同一生态系统中具有空间分布特征。

国内最早开始研究叶片吸水现象的是关于西双版纳雨林附生与非附生植物的比较^[38],结果表明,附生植物能够利用凝结水。随后,这种现象引起了诸多学者的关注,并将研究范围拓展到干旱荒漠植物。庄艳丽等^[40]通过人工模拟凝结水梯度证明,一年生草本雾冰藜 (叶片被毛) 能够吸收冠层凝结水,主要用于促进地上部分的生长,而无毛植物沙米在不同的凝结水梯度下未表现出明显差异。郑新军等^[8]研究了准噶尔盆地 51 种荒漠植物的叶片吸水能力与植物功能性状的关系,并提出与叶片含水量增加率 (LUWC) 相比叶片单位面积吸收量 (R_w) 更适合用于评价叶片吸收水分的能力。

4 展望

冠层凝结水可降低叶片温度,通过润湿叶片改善荒漠植物由于蒸腾导致的水分丧失,可以清洁叶片,并且能够进入植物体内,增加叶片含水量^[39],提高植物水势^[58]和净光合速率^[30]。除此之外,叶片吸收利用的凝结水还可能转运至其他器官,影响植物全株的生理过程与生态适应,如提高开花和结实量^[59]、调整根冠比^[39]和延长幼苗的存活^[22,50]。以上研究说明,大部分学者关注凝结水的形成机制与生态作用,多年来积累的研究成果已经形成一系列理论并被其他学者广泛接受,但是对于荒漠植物吸收冠层凝结水的内在机理缺乏系统认识。

参考文献

- [1] 宋怡,马明国. 基于 SPOT VEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 89-94.
- [2] 刘波,肖子牛,马柱国. 中国不同干湿区蒸发皿蒸发和实际蒸发之间关系的研究[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 629-636.
- [3] THOMAS D S G. Arid zone geomorphology-process, form and change in dryland[M]. 2nd Edition, New York: John Wiley & Sons Press, 1997.
- [4] 钱正安,宋敏红,李万源,等. 全球、中蒙干旱区及其部分地区降水分布细节[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 1-12.
- [5] 杨兴华,河清,霍文,等. 塔克拉玛干沙漠南缘风沙跃移运动研究:以策勒为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 910-915.
- [6] 李新荣,赵洋,回嵘,等. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [7] 张静,张元明,周晓兵,等. 生物结皮影响下沙漠土壤表面凝结水的形成与变化特征[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6600-6609.
- [8] 郑新军,李嵩,李彦. 准噶尔盆地荒漠植物的叶片水分吸收策略[J]. 植物生态学报, 2011, 35(9): 893-905.
- [9] ZHANG Q, WANG S, YANG F L, et al. Characteristics of dew formation and distribution, and its contribution to the surface water budget in a semi-arid region in China [J]. Boundary-layer Meteorology, 2015, 154(2): 317-331.
- [10] LAUENROTH W K, BRADFORD J B. Ecohydrology of dry regions of the

- United States; Precipitation pulses and intraseasonal drought [J]. *Ecohydrology*, 2009, 2(2): 173–181.
- [11] 秦璐. 不同盐生境下盐穗木群落凝结水形成机制及其生态效应[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
 - [12] MEAKIN P. Droplet deposition growth and coalescence [J]. *Reports on progress in physics*, 1992, 55(2): 157.
 - [13] BEYSENS D. Dew nucleation and growth [J]. *Comptes rendus physique*, 2006, 7(9/10): 1082–1100.
 - [14] BEYSENS D, MILIMOUK I, NIKOLAYEV V, et al. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: A study to improve water yield [J]. *Journal of hydrology*, 2003, 276(1/2/3/4): 1–11.
 - [15] 方静, 丁永建. 荒漠绿洲边缘凝结水量及其影响因子[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 755–760.
 - [16] XU Y Y, ZHU H, TANG J, et al. Chemical compositions of dew and scavenging of particles in Changchun, China [J]. *Advances in meteorology*, 2015, 1: 4–14.
 - [17] 阎百兴, 王毅勇, 徐治国, 等. 三江平原沼泽生态系统中露水凝结总量[J]. *湿地科学*, 2004, 2(2): 94–99.
 - [18] 张静, 张元明, 周晓兵, 等. 生物结皮影响下沙漠土壤表面凝结水的形成与变化特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6600–6609.
 - [19] 李洪波. 半干旱区凝结水形成机制及对植物水分特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
 - [20] 郭斌, 陈亚宁, 郝兴明, 等. 不同下垫面土壤凝结水特征及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1963–1974.
 - [21] 陶冶, 张元明. 叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 7–16.
 - [22] STONE E C. Dew as an ecological factor; II. The effect artificial dew on the survival of *Pinus ponderosa* and associated species [J]. *Ecology*, 1957, 38(3): 414–422.
 - [23] EVENARI M, SHANAN L, TADMOR N. The Negev-The Challenge of a Desert [M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.
 - [24] GOOSSENS D, OFFER Z Y. Comparisons of day-time and night-time dust accumulation in a desert region [J]. *Journal of arid environments*, 1995, 31(3): 253–281.
 - [25] AGAM N, BERLINER P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments: A review [J]. *Journal of arid environments*, 2006, 65(4): 572–590.
 - [26] SUBRAMANIAM A R, KESAVA RAO A V R. Dew fall in sand dune areas of India [J]. *International journal of biometeorology*, 1983, 27(3): 271–280.
 - [27] GUTTERMAN Y, SHEM-TOV S. Mucilaginous seed coat structure of *Carichtera annua* and *Anastatica hierochuntica* from the Negev Desert highlands of Israel, and its adhesion to the soil crust [J]. *Journal of arid environments*, 1997, 35(4): 695–705.
 - [28] DUVDEVANI S. Dew in Israel and its effect on plants [J]. *Soil science*, 1964, 98(1): 14–21.
 - [29] Li X Y. Effects of gravel and sand mulches on dew deposition in the semi-arid region of China [J]. *Journal of hydrology*, 2002, 260(1/2/3/4): 151–160.
 - [30] MUNNÉ-BOSCH S, NOGUÉS S, ALEGRE L. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two evergreen shrubs growing in Mediterranean field conditions [J]. *New phytologist*, 1999, 144(1): 109–119.
 - [31] GOLDSMITH G R, MATZKE N J, DAWSON T E. The incidence and implications of clouds for cloud forest plant water relations [J]. *Ecology letters*, 2013, 16(3): 307–314.
 - [32] MUNNÉ-BOSCH S, ALEGRE L. Role of dew on the recovery of water-stressed *Melissa officinalis* L. plants [J]. *Journal of plant physiology*, 1999, 154(5/6): 759–766.
 - [33] JACOBS A F G, HEUSINKVELD B G, BERKOWICZ S M. Passive dew collection in a grassland area, the Netherlands [J]. *Atmospheric research*, 2008, 87(3/4): 377–385.
 - [34] MUSKAŁA P, SOBIK M, BŁAŚ M, et al. Pollutant deposition via dew in urban and rural environment, Cracow, Poland [J]. *Atmospheric research*, 2015, 151: 110–119.
 - [35] KIDRON G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel [J]. *Atmospheric research*, 2000, 55(3/4): 257–270.
 - [36] XU Y Y, YAN B X, ZHU H. Leaf dew contributes nutrients to paddies and improves rice growth [J]. *Acta agriculturae scandinavica section B: Soil and plant science*, 2013, 63(2): 97–106.
 - [37] TAKENAKA N, SUZUE T, OHIRA K T, et al. Natural denitrification in drying process of dew [J]. *Environmental science and technology*, 1999, 33(9): 1444–1447.
 - [38] 郑玉龙, 冯玉龙. 西双版纳地区附生与非附生植物叶片对雾水的吸收[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 977–981.
 - [39] 庄艳丽, 赵文智. 凝结水对温带荒漠一年生植物生态作用研究[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(4): 526–532.
 - [40] 庄艳丽, 赵文智. 荒漠植物雾冰藜和沙木叶片对凝结水响应的模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1068–1074.
 - [41] 潘颜霞, 王新平, 张亚峰, 等. 沙坡头地区吸湿凝结水对生物土壤结皮的生态作用[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 653–658.
 - [42] 余绍文, 孙自永, 周爱国, 等. 罗布泊北部地区凝结水对地下水补给作用的模拟[J]. *地质科学情报*, 2011, 30(6): 116–121.
 - [43] 黄金廷, 王文科, 马雄德, 等. 鄂尔多斯沙漠高原区白垩系含水层补给的探讨[J]. *地下水*, 2005, 27(6): 457–459.
 - [44] 周金龙, 董新光, 艾克日木·阿不都拉. 天山北麓平原区凝结水的观测试验分析[J]. *新疆水利*, 2003, 25(5): 15–20.
 - [45] 梁永平, 阎福贵, 侯俊林, 等. 内蒙桌子山地区凝结水对岩溶地下水补给的探讨[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(4): 320–323.
 - [46] 张建山, 许颜卿, 李哲. 陕北沙漠滩区降水入渗与凝结水补给机理试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 124–126.
 - [47] BREZEALE E L, MCGEORGE W T, BREZEALE J F. Moisture absorption by plants from an atmosphere of high humidity [J]. *Plant physiology*, 1950, 25(3): 413–419.
 - [48] STONE E C, WENT F W, YOUNG C L. Water absorption from the atmosphere by plants growing in dry soil [J]. *Science*, 1950, 111(2890): 546–548.
 - [49] MOONEY H A, GULMON S L, EHLERINGER J, et al. Atmospheric water uptake by an Atacama Desert shrub [J]. *Science*, 1980, 209(4457): 693–694.
 - [50] MARTIN C E, VON WILLERT D J. Leaf epidermal hydathodes and the ecophysiological consequences of foliar water uptake in species of *Crassula* from the Namib desert in southern Africa [J]. *Plant biology*, 2000, 2: 229–242.
 - [51] BRESHEARS D D, MCDOWELL N G, GODDARD K L, et al. Foliar absorption of intercepted rainfall improves woody plant water status most during drought [J]. *Ecology*, 2008, 89(1): 41–47.
 - [52] LIMM E B, DAWSON T E. *Polystichum munitum* (Dryopteridaceae) varies geographically in its capacity to absorb fog water by foliar uptake within the redwood forest ecosystem [J]. *American journal of botany*, 2010, 97(7): 1121–1122.
 - [53] ELLER C B, LIMA A L, OLIVEIRA R S. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae) [J]. *New phytologist*, 2013, 199(1): 151–162.
 - [54] GOTSCH S G, ASBJORNSEN H, HOLWERDA F, et al. Foggy days and dry nights determine crown-level water balance in a seasonal tropical montane cloud forest [J]. *Plant cell & environment*, 2014, 37(1): 261–272.
 - [55] CORBIN J D, THOMSEN M A, DAWSON T E, et al. Summer water use by California coastal prairie grasses: fog, drought, and community composition [J]. *Oecologia*, 2005, 145(4): 511–521.
 - [56] DAWSON T E. Fog in the California redwood forest: Ecosystem inputs and use by plants [J]. *Oecologia*, 1998, 117(4): 476–485.
 - [57] KIDRON G J, STARINSKY A. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert (Negev): Cobbles serve as sink for nutrients [J]. *Journal of hydrology*, 2012, 420/421: 284–291.
 - [58] ZHUANG Y L, RATCHIFFE S. Relationship between dew presence and *Bassia dasyphylla* plant growth [J]. *Journal of arid land*, 2012, 4(1): 11–18.
 - [59] 冉启洋. 凝结水对荒漠短生植物狭果鹤虱个体、种群和繁殖对策的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.