

DOI:10.13866/j.azr.2026.05.05
CSTR:32277.14.AZR.20260505

近地表水汽对植被水分补偿及量化研究进展

杨艳¹, 张维江^{1,2}, 马婷¹, 王磊¹, 马波^{1,2}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 在气候变化导致极端干旱频发背景下,近地表大气水(Near-Surface Atmospheric Water, NSAW)作为干旱区生态系统的重要隐性水源,其介导的水分补偿对缓解植被水分胁迫具有重要意义。然而,目前对于NSAW对植被水分的补偿过程、补偿机理、补偿权重及相关的量化方法仍需要进一步明确。基于此,本文对NSAW水文过程和生态作用机理、NSAW对植被与土壤水分补偿机制及NSAW相变量化方法进行了研究进展综述。已有的重要研究成果包括:植被主要通过气孔、角质层或特有结构等直接吸收利用NSAW,这种方式在植被获取NSAW水分过程中占主导地位;NSAW水分经由土壤吸湿或液化,通过根系水力再分配(HR)过程间接调节植被水分,形成新的水分平衡;在NSAW相变量化和模拟方面,微气象监测与稳定同位素技术相结合,实现了对NSAW的动态观测和水分来源的高精度解析。由于缺乏材料物理学特性相关参数,尤其是热力学参数,有关NSAW水分相变的量化难以形成共识,如叶片吸收气态水的效率参数缺失、多尺度耦合模型缺乏等。基于已有研究成果,本文认为未来需重点突破NSAW—碳同化耦合效应及多源数据协同监测技术开发、多尺度动态模型构建,可为旱区水资源高效利用提供理论依据。

关键词: 近地表大气水; 叶片吸水; 水分补偿; 水力再分配

近几十年来,虽然全球植被生物量与叶面积指数整体呈增加趋势,但气候变化引发降水格局发生了改变^[1]。干旱地区降水稀少且蒸发强烈导致水资源短缺问题更加突出,植被长期面临季节性干旱与强烈蒸散造成的水分胁迫仍然是生态系统难以改善的重要因素^[2-3]。然而,地球上最干燥的地方之一、年平均降雨量不到1 mm的智利北部阿塔卡马沙漠,一种名为松萝凤梨(*Tillandsia landbeckii*)的无根附生植物却能够通过叶片毛状体吸收雾水以维持生存,打破了人们对植物水分来源的固有认知^[4]。长期以来,学术界普遍认为植物依赖降水和地下水维持生命活动,水分获取被简化为“降水入渗—根系吸收”的单一路径。但越来越多的研究表明,近地表大气水(Near-Surface Atmospheric Water, NSAW)作为陆地生态系统的关键组分,其生态水文功能日益受到关注^[5-6]。NSAW指地表附近大气中未形成降水的水分相态,通过自然凝结或人工技术干预可

为干旱区生态和人类活动提供重要水源。研究认为,大气中的水量相当于地球湖泊中所有淡水总量的约10%^[7],来源包括地表蒸发、植物蒸腾与局地水汽输送。NSAW可以有效提升植物水分利用效率、降低蒸腾需求、改善微环境,进而维持脆弱生态系统的初级生产力。Kim等^[7]认为利用金属有机框架(Metal-Organic Framework, MOF)可以在相对湿度低至20%的情况下从沙漠水汽中获取水分,为解决沙漠缺水问题提供了新方法。

NSAW可为干旱地区进行植被水分有效补偿。植被水分补偿指植被通过多种途径从外部环境获取水分来应对水分胁迫、维持正常生理活动的适应性策略,它依赖于大气水分和土壤水分的补充^[8]。而NSAW作为植被水分补偿的关键来源之一,其补偿机制高度依赖环境背景,在干旱、半干旱及雾频发区域(如沿海、山地)作用显著,而在湿润多雨区则影响较弱^[9-10]。特别是在干旱或半干旱地区,

收稿日期: 2025-08-05; 修订日期: 2025-10-09

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC02018);宁夏重点研发计划项目(2023BEG02054);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 杨艳(2001-),女,硕士研究生,主要研究方向为农业生态水文。E-mail: 12023131246@stu.nxu.edu.cn

通讯作者: 马波。E-mail: boma@nxu.edu.cn

植被通过叶片吸水和根系吸水等调节机制,可以有效地利用这些NSAW,增强其对干旱环境的适应能力^[11-12]。但植被水分补偿的方式曾长期局限于根系吸收土壤水的单一路径,并且Monteith等^[13]曾提出经典论断,叶片表面露水蒸发速率太快以至于难以被植被吸收,若根系水分供应充足,叶片吸水对植被整体水分平衡的贡献率往往可以忽略不计。然而Hales^[14]早在1727年首次提出了植被可以通过叶片吸收水分,由于早期的技术无法准确区分根系吸水与叶片吸水,且难以定量测定吸水量,使得叶片吸水的生态功能长期以来备受争议。随着稳定同位素示踪技术、茎干液流及水势测定等监测方法的迅速发展^[15-18],发现在不同生态系统中均存在植物叶片吸水现象^[4,19],这一水分获取途径能有效改善植株水分状况,促使学界重新审视叶片吸水在植物水分平衡中的潜在作用。Hayes等^[16]则直接通过稳定同位素技术证实,叶片吸水可贡献高达32%的植物水分来源,并显著影响物种分布格局。Eller等^[17]通过树液流动、荧光示踪剂以及稳定同位素多种方法得出雾水直接通过叶片角质层渗透,贡献了高达42%的叶片总含水量。目前关于根系吸水与叶片吸水两种途径在植被水分补偿中的发生条件、协同机制及生态效应仍缺乏系统性归纳分析,这主要体现在植物对NSAW的吸收方式尚不明确;叶片直接吸收液态水与气态水的响应路径缺乏比较;NSAW通过土壤吸湿与根系再分配等间接途径对植被水分补偿作用还没有被充分整合^[9,20]。因此,本文旨在系统梳理NSAW对植被水分补偿效应的研究进展,通过比较植物叶片吸水与土壤吸水两种补偿方式的差异,整合现有机理认知,以期为深入理解植被的水分利用策略和优化水资源管理等问题提供科学依据。

1 NSAW水文过程及生态作用机理

1.1 近地表水汽水文过程

NSAW以气态(水汽)、液态(露水、雾水)和固态(霜)形式存在,其相变受温度、湿度、风速或地表特性共同影响。水汽是NSAW最主要的组成部分,全球约85%的水汽来源于海洋的蒸发,并通过大气环流向陆地近地表区域输送,其余来自土壤和地表水体蒸发、植物蒸腾等^[21](图1)。近地表区域的水汽

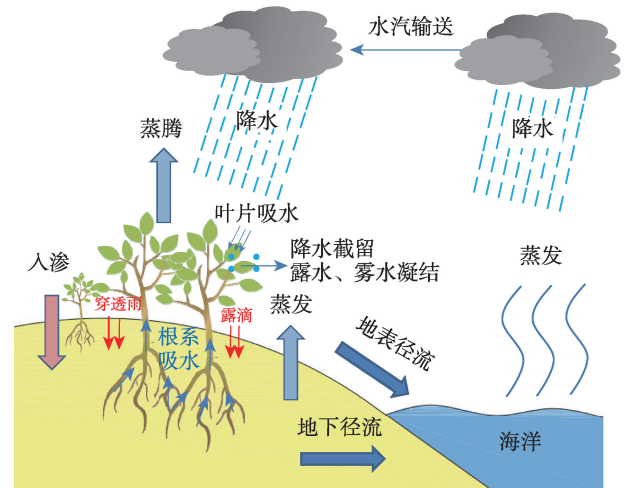


图1 植物水分补偿方式及水循环的过程

Fig. 1 Plant water compensation mechanisms and the water cycle process

含量还受到冠层降水截留的影响,被截留的降水在适宜的气象条件下(如温度升高,风速增加等)再次蒸发,直接且快速地向近地表补充水汽^[22]。在适宜条件下,水汽通过地表辐射冷却和空气团整体冷却凝结成露水或雾水^[5-6]。当环境温度升高或湿度降低时,露水和雾水重新蒸发为水汽,返回到大气中。霜是近地面水汽在物体表面直接凝华而成的冰晶,随着温度的升高,霜可融化为液态水或者升华为水汽。三者通过蒸发-凝结过程持续循环,构成陆地干旱生态系统中重要的非降水水源。

露水的形成是由于物体的表面温度因辐射冷却而降至露点温度以下,导致空气中的水汽在其表面凝结的物理现象^[5]。较小的气温-露点差、较高的相对湿度以及适度的风速均有利于露水的形成^[5]。一般认为形成露水的水汽来源主要有两种,一是植物从空气中获得的水汽,包括地表积水、雨水蒸发后的水汽等;二是植物自身的蒸腾作用或蒸发过程,即植物吐水(蒸馏作用)^[23](图2)。

当前关于露水的研究主要聚焦于干旱与半干旱区。相比之下,雾水的形成高度依赖于高饱和和水汽条件,研究多集中于沿海地区^[24-25]。雾水的水汽源自局地过程,如云底降低、层云增厚、辐射冷却等,受天气尺度系统(气旋/反气旋)直接控制^[24]。雾水的形成机制与露水存在明显差异,其本质为空气中水汽达到饱和后形成悬浮小液滴,随后可通过重力沉降或植被截获到达物体表面^[25]。雾水的形成

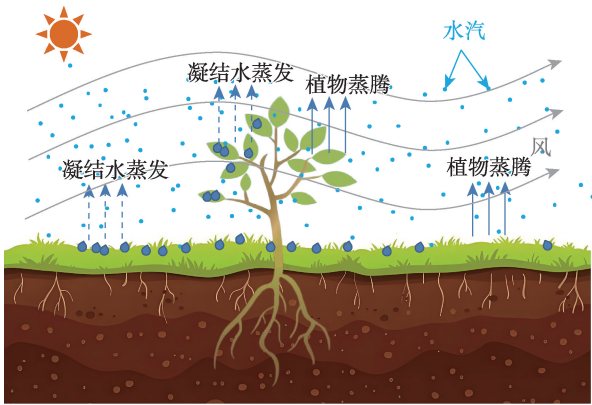


图2 近地表水汽的循环过程

Fig. 2 Cycle of near-surface water vapor

受到植被特性、气候因素和地形特征等多重因素的影响^[26-27]。当较暖空气和较冷物体表面接触时空气发生冷却,达到水汽过饱和时多余水汽便会析出。若此时温度低于0℃,多余的水汽就在物体表面凝华为冰晶,即霜^[28]。虽然霜融化可提供微量水分,但霜的形成伴随低温,土壤温度下降等问题,进而显著降低植物根系的吸水能力,因此其水分补给作用通常不足以抵消其造成的生理干旱危害。近地表水汽相变形态及形成条件如表1所示。

1.2 NSAW的生态作用机理

NSAW是维持干旱半干旱生态系统水分平衡的关键补给源。干旱地区降水稀少,土壤水分匮乏,

而露水可以为植物提供重要的水分补给^[10,29-30]。内蒙古毛乌素沙地中四种优势灌木物种能够通过叶片毛状体、角质层和气孔吸收露水,进而提升叶片和茎干的水势,改善这些灌木物种的水分状况^[29]。类似地,在巴西半干旱地区,常见灌木鳞状风车子(*Combretum leprosum*)也展现出通过毛状体直接吸收露水的能力,吸收的水分通过脉间叶肉在叶片内重新分配,能够最大程度地缓解干旱条件所带来的水分不足问题^[30]。除此之外,在一些沿海山地和高海拔地区,雾水频繁出现,植物可以通过叶片直接吸收雾水,补充土壤水分的不足^[17,31],如附生植物铁兰属(*Tillandsia*)通过特有的表皮结构(如鳞片)高效截获雾水^[31],另有研究显示雾水对巴西林仙(*Drimys brasiliensis*)叶片总含水量的贡献率可达42%^[17]。佐法尔山脉森林拦截的雾水可增加林下水分输入量,增幅达15%~150%^[32]。NSAW不仅可以为植被补给水分,而且其相变过程亦具有重要的微气候调节功能。尤其是在温带和热带地区,昼夜温差较大,NSAW的调节作用能够帮助植物更好地适应环境变化^[12,33]。目前现有研究主要聚焦于近地表水汽通过形态转换(如形成露水、雾水等)后的水文及生态作用机制。本文将从直接补偿(叶片吸收)与间接补偿(土壤-植被生态系统)两个维度来系统归纳NSAW对植被水分补偿的研究进展。

表1 近地表水汽相变形态及形成条件

Tab. 1 Composition and formation conditions of near-surface atmospheric water

NSAW相态类型	存在形态	形成条件与环境因子	典型气象环境	地理分布	
气态	水汽	空气中的实际水汽压低于该温度下的饱和水汽压	昼夜均可,无特殊限制	全球普遍	
液态	露水	物体表面辐射冷却至露点以下,近地表空气相对湿度>80%,风速1~3 m·s ⁻¹	晴朗、微风、高湿度的夜间或清晨	中低纬度干旱区农田或草原等植被覆盖区	
	雾	平流雾	暖湿空气水平移动(平流)至较冷的下垫面,水汽冷却达到饱和凝结而形成(如冷洋流海域、解冻后寒冷陆面等)	中低风速(2~7 m·s ⁻¹)、高湿度、冷暖表面温差显著	沿海区域 低海拔内陆
		辐射雾	晴朗无云的夜晚,地表辐射冷却使近地面空气降温至露点以下,水汽凝结形成雾	晴朗、微风(1~3 m·s ⁻¹)、近地面水汽比较充沛且稳定有逆温存在的夜间和早晨	内陆干旱河谷 洼地
	蒸发雾	冷空气流经温暖水面,如果气温与水温相差很大,则蒸发大量水汽,在水面附近的冷空气便凝结成雾	暖湿下垫面(如雪面、水体),低层湿度大	湖泊、海洋 雪后地区	
固态	霜	物体表面辐射冷却至0℃以下,近地面空气相对湿度高,水汽直接凝华	晴朗、微风 湿度大的夜间	高纬度地区 高山地区 内陆荒漠的寒冷夜间等	

2 NSAW对植被直接补偿机制

2.1 植被叶片对液态水的吸收

植被叶片对液态水吸收通常以叶面存在液态水膜为前提,其发生虽不依赖绝对的空气相对湿度阈值,但在自然条件下叶面液态水的形成与维持,往往需要较高的环境湿度,水分经叶面结构(如角质层、气孔、叶毛等)进入叶片内部^[34-35]。有研究表明,植物冠层凝结的露/雾水可直接为叶片补充水分^[4,16-17],目前通过叶片表面直接吸水的现象已在77科233种植物中得到证实,涵盖热带雨林、云雾林、荒漠等多种生物群落^[36]。叶片吸水的本质是通过降低内部水势,使气孔腔内饱和水汽压低于环境水汽压,从而逆转水汽扩散梯度,驱动水分从大气进入叶片,并可能向根系运输^[37]。较高的空气相对湿度是叶片吸水的重要前提,高相对湿度维持了良好的叶片水分状况^[38],促进气孔开放的同时降低了大气蒸汽压饱和差^[39],有利于雾/露水在叶面凝结,方便叶片吸收水分。除此之外,叶片自身的水势对其吸水效率也会产生影响,随着叶片水势的下降,叶片与外部水膜之间的水势差增大,从而驱动更多水分吸收^[40]。在典型的干旱条件下,云雾林优势树种巴西林仙(*Drimys brasiliensis*)的叶片水势可降至-1.54 MPa,而叶面雾水形成的水膜水势接近于0 MPa^[41],由此形成的显著水势差($\Delta\Psi > 1.5$ MPa)成为驱动水分从叶表面进入叶片内部的根本动力。但个别物种如垂枝桦(*Betula pendula*)、北欧花楸(*Sorbus aucuparia*)等植被叶片吸水能力并不受叶片水势的影响,这些物种的水力调节策略(如等水型行为)导致叶片水势在干旱中保持稳定,削弱了水势梯度对叶面吸水的驱动^[42]。

除上述因素外,植物叶片的形态、附属结构及微观结构也会影响其对NSAW的吸收^[30,43]。露水可以通过气孔、角质层、叶毛、排水器等多种途径进入植物叶片,随后经叶肉组织向木质部运移^[18,44]。由于角质层导度远低于气孔导度,且在气孔开放时,其在总导度中的占比通常不足5%,因此气孔常被视为叶片吸水的主要通道^[36]。气孔关闭时角质层主导吸水,但吸水速率显著降低,仅为开放气孔的近33%^[45]。特别需要指出的是,多种C₃、C₄植物在夜间表现出气孔不完全关闭,该现象是一种广泛存在的

适应性性状,受遗传和环境等因素的共同调控^[46]。然而,Eller等^[11]提出了不同观点,他们认为叶片吸水的主要途径是水分通过角质层的分子间隙和亲水基团渗透进入,而气孔因在叶片干燥或夜间处于关闭状态,其对叶片吸水的实际贡献有限。不同物种的叶片结构和生态适应策略差异决定了其主要吸水途径,并且还会受到环境因素和实验条件的影响。除气孔和角质层外,部分植物的叶毛也具有亲水性,能够促进叶面浸润乃至直接吸收水分^[47]。例如巴西半干旱地区常见灌木鳞状风车子(*Combretum leprosum*),其叶片表面的半透明毛状体富含亲水性多糖,可以有效吸收露水并改善叶片水分状况^[30]。此外,少数荒漠植物还进化出独特的叶表吸水器官,如红砂(*Reaumuria songarica*)的叶片上具有吸水性鳞片,能够吸收大气中的非饱和水^[43]。Martin等^[34]在南部非洲纳米布沙漠的系统调查进一步研究揭示,46种景天科青锁龙属(*Crassula*)植物中,有27种植物能够利用排水组织吸收叶片表面水分。植物叶片吸水是跨物种的适应性策略,由水势梯度驱动,依赖高湿度环境,通过气孔、角质层等结构实现,并受多种因素的共同调控。需要指出的是,现有研究多集中于叶片对露水或雾水的吸收,而叶片对于另一相态——气态水的直接吸收与否及其实现机制,则是一个更为复杂且存在争议的科学问题。

2.2 植被叶片对气态水的吸收

叶片对气态水(水汽)的直接吸收,其发生条件是叶片水势必须显著低于大气水势,从而逆转水汽扩散方向。早期研究认为植物气孔仅输出水汽,且叶片疏水性和水的表面张力会阻止液态水进入气孔^[48]。Ganong^[49]曾指出即使是处在水汽饱和和环境,向日葵属、天竺葵属、秋海棠属、锦紫苏属、千里光属与蓖麻属植物直到萎蔫也未通过叶片吸收水汽。然而也有学者持不同观点,认为土壤环境处于轻度或中度干旱而空气湿度较高时,植物可以通过叶片气孔吸收水汽来补充水分,减弱土壤缺水造成的伤害^[50],此后Vesala^[51]等通过物理模型和数学计算,首次从理论层面证明了叶片通过气孔直接吸收气态水的物理机制,即叶片在低水势下,气孔可以直接吸收环境中的气态水。该过程的核心机制在于,当叶片水势低于大气水势,气孔腔内水汽压降低,促使环境中水汽向叶片内部扩散,这一过程被

称为“反向蒸腾”^[52],以强调其与常规蒸腾作用在水分输送方向上的对立。

对于NSAW对植被水分直接补偿过程如表2所示。虽然已有研究证明叶片可以直接吸收水汽,但对水汽吸收量的测量仍较为困难,因为水汽以气态形式存在,无法直接观察,定量化水汽的吸收需要更精细的仪器和方法。其次,在自然条件下,气孔是否开放、是否被水膜阻塞等因素难以控制与量化。此外是否存在其他通道(如角质层、毛状体等)在特定条件下主导吸水,目前尚不明确。最后,尽管一些高精度的设备如环境扫描电子显微镜(ES-EM)等能够提供一定程度上的数据支持,但这些设备昂贵、操作复杂,且难以进行大规模的长时间监测,因此,未来仍需开展进一步的研究。

3 NSAW对土壤-植被系统的间接补偿

3.1 土壤对NSAW的吸湿过程

NSAW除直接对植被进行水分补偿外,还可通过土壤获取NSAW间接对植被水分进行补偿,或者通过土壤获取NSAW以替代部分土壤水分蒸发。在无降水或灌溉条件下,表层土壤获取NSAW水分的方式包括雾沉积、露水形成及水汽吸附^[10]。雾沉积对土壤水分的补充通常在夜间或清晨等多雾时段较为显著,可作为持续且稳定的水分补充来源,增加表层土壤的水分含量^[53]。露水则通过在土壤表面凝结的方式为土壤提供水分,特别是在干旱地区,露水可以在没有降水的情况下,为土壤提供宝贵的水分来源^[5]。郭占荣等^[54]在西北干旱区的研究表明,细砂条件下凝结水可使表层土壤含水量提升约0.43%,该数值接近荒漠耐旱植物的萎蔫系数。土壤水汽吸附是由土壤颗粒表面分子/离子

与水汽分子间的相互作用力驱动的物理过程,其发生条件为土壤温度高于露点温度且大气相对湿度高于土壤表面湿度^[55]。该过程受多重因素调控,主要取决于土壤颗粒吸附水汽的能力与水汽来源。吸附面表面积越大,可供水汽附着的位点越多,捕获水汽的能力也越强。黏土颗粒因具有极高的比表面积而表现出明显的水汽吸附优势,土壤吸附水量随黏粒含量增加而增加^[55]。土壤含水量的变化也会影响其吸附能力,当土壤含水量下降时,颗粒表面水膜变薄,暴露出更多活性位点,从而增强对水汽的吸附能力。除此之外,近地表气象要素通过调控水汽通量直接影响吸附过程。近大气压强升高可扩大土壤颗粒和水汽的接触面积,提高吸附效率。较高的空气湿度及温度梯度配合适宜的风速,能够驱动水汽向土壤孔隙输送,为吸附过程提供充足水汽来源^[56]。虽然NSAW对土壤水分的直接补给量有限,但其在改善植物水分状况、维持干旱区生态系统稳定性方面,仍具有不可忽视的生态作用。

3.2 NSAW对植被水分补充的根系水力再分配

土壤水分是植物根系获取水分的主要来源,也是调控水文过程的关键因子。在大多数情况下,受根冠间水势梯度的驱动,根系从土壤中吸收的水分经木质部输送到冠层,最终通过气孔蒸腾作用散失至大气^[57]。但在特定条件下由于土壤水势梯度的驱动作用,植物根系可将水分从土壤中较湿润的土壤区域被动运输至较干燥区域,该过程称为水力再分配(Hydraulic Redistribution, HR)^[58-59]。HR的发生与否和大小受植物特征、气候因子、土壤特性和地下水共同调控^[60],广泛存在于各类生态系统和植物类别中,对植被有着不可忽视的作用。Wei等^[61]研究发现在0~30 cm的根系活跃层,HR平均能补充34%~50%的日间水分消耗,显著延缓了土壤的干燥

表2 植物叶片对NSAW吸收类型对比

Tab. 2 Comparison of water uptake patterns in plant leaves under NSAW conditions

水分形态	发生条件	关键吸收结构	影响因素
叶片吸收 液态水	前提:叶面存在液态水膜 环境:高湿度环境,有利于液态水的形成和维持 ^[34-35,38]	气孔/角质层、特化吸水结构等 ^[18,34,43-44]	环境相对湿度、叶片水势、气孔状态、叶面结构特征等 ^[30,38,40]
叶片吸收 气态水	前提:叶片水势<<大气水势 环境:没有绝对的空气湿度阈值 ^[52]	气孔 ^[50-51]	叶片与大气之间的水势差/水汽压差/叶片水势、空气相对湿度、气孔开闭状态等 ^[50-52]

速度,使土壤水分维持在植物可利用水平。同时 Lee 等^[62]通过模型与数据融合进一步精确量化了 HR 对两种共存植被水分利用的具体贡献比例,发现 HR 支撑了牧豆树 47% 的蒸腾耗水,但仅支撑了丛生禾草 9% 的蒸腾,首次揭示 HR 在某些生态系统中是导致竞争而非促进的过程。HR 作为植物根系基于水势梯度差异对土壤水分进行的主动调控过程,其通过维持浅层土壤和根系的活性,为植被有效利用 NSAW 奠定了坚实的基础^[63]。

值得注意的是,叶片吸水与 HR 并非孤立过程。已有研究发现露水和无露水日 HR 存在显著差异^[64],Gao 等^[64]研究表明在无水分亏缺条件下,冠层露水会促进 HR 的发生,而在轻微、中等和严重土壤水分缺失条件下,冠层露水则抑制了 HR 的产生。更为直接的证据来自 Cassana 等^[18]的同位素示踪实验,处于干旱胁迫下的狭叶南洋杉(*Araucaria angustifolia*)将通过叶片吸收的氙标记水向下运输并释放到根际土壤中,并且根据模型计算表明,有高达 30% 的水分来源于叶片吸收后输送下来的雾水。当植物通过叶片吸收 NSAW 后,叶水势瞬时上升^[16,35],甚至通过木质部影响根区水势^[18],形成逆水势梯度,由此推测露水或雾水的形成可能通过影响叶-根-土壤系统的水势梯度进而调节 HR 强度,但这一机制仍需后续实验证实。未来应结合同位素示踪与根区水势同步监测,量化叶面吸水对 HR 的激发效应及其对植物水分利用效率的贡献。

4 NSAW 相变量化方法与模型研究进展

NSAW 对植物水分补偿作用的研究经历了从现象观察到机理解析、再到模型模拟的逐步深化,其量化方法不断发展完善。准确量化 NSAW 的凝结量,不仅推动了对非降水水源在生态系统水循环中作用的重新认识,也是揭示植物-水分关系机制与构建生态水文模型的关键。目前对于 NSAW 相变量化主要是对于凝结水的量化,也即对于液化过程的量化。

4.1 近地面气态水液化理论研究及量化方法

4.1.1 凝结水量仪器直接观测方法 基于光学原理及水量平衡原理,测定凝结水量的典型方法主要有 Duvdevani 法^[65]、人造凝结面法^[66]、Hiltner 露水平衡

仪法和微型蒸渗仪法^[67-69]等。Duvdevani 法是应用较早的凝结水观测方法,其原理在于通过木板装置收集凝结水,将凝结水滴的外观、分布与一系列标准化的凝结水分级照片进行对比从而计算凝结水量,但这种方法的不足之处是难以准确观测到凝结水量,无法测量凝结水的持续时间,且表面涂料易损坏,进而影响观测精度^[65]。人造凝结面法对 Duvdevani 法进行了改进,使用高性能吸水布附着于玻璃板作为凝结面观测凝结水量,缺点在于无法估算凝结速率和持续时间^[66]。Hiltner 露水平衡仪法通过对人造冷凝板的连续称重计算凝结水量的变化,由于人造冷凝板与土壤表面的凝结作用存在差异,被认为更适用于测量“潜在凝结水量”^[70]。微型蒸渗仪法由于其凝结材料的可选性被认为是目前最可行且应用较为广泛的凝结水观测方法^[67-69],特别是在不同下垫面、不同地表类型凝结水形成和消散过程得到应用^[54]。不足之处在于易受到外部干扰,如动物、管理操作和风等^[71]。近年来,基于仿真技术,电介质式叶片湿度传感器(Leaf Wetness Sensor, LWS)成为一种非常有效的露水量观测仪器^[72],能够连续观测叶片凝结水产量变化和持续时间变化。

4.1.2 凝结水量计算方法 除了利用仪器和相关设备直接测定凝结水量外,还可以用能量方程计算凝结水量,其物理学原理在于潜热通量计算。Beysens 等^[73]利用能量平衡方程计算出水汽凝结时释放出的潜热通量推算出凝结水量,建立了地表热量和质量交换过程的数学模型,模拟凝结水的形成与变化过程。常用计算潜热通量的方法有 Penman-Monteith 公式^[68]、涡度相关法(Eddy Covariance Technique, EC)、空气动力学法和波文比能量平衡法^[74-77]。

Penman-Monteith 公式估算凝结水量的表达式如下^[67]:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G_0) + \rho_a c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

式中: λE 为潜热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); R_n 为净辐射通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); G_0 为地表土壤热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); ρ_a 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p 为恒压下空气比热($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); r_a 为水汽传输空气动力学阻力($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

当计算 λE 值为负时认为没有发生蒸散,而是有凝结水产生。

Penman-Monteith 公式估算凝结水量的缺陷在于不能很好地展现露珠率的季节趋势,低估了凝结水量^[78]。

涡度相关法是 Swinbank^[79]于1951年提出的一种微气象学测量方法,通过测量湍流脉动值计算大气与下垫面之间物质与能量交换,被用来计算凝结水量,如式(2)^[80]:

$$\lambda_v E = \rho \lambda_v \overline{w'q'} \quad (2)$$

式中: λ_v 为蒸发潜热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$); E 为单位时间的蒸发蒸腾或露水量(mm); ρ 为空气密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); w 为垂直风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); q 为大气比湿($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$); $\overline{w'q'}$ 为垂直风速脉动与比湿脉动的协方差,即湍流通量。当计算所得 $\lambda_v E$ 为正值时表示蒸散发过程,为负值时表示露水累积过程。

利用涡度相关法估算凝结水量时由于低风或雾会对传感器干扰,对潜热通量的估算降低会达到2/3,引起估算偏差^[68,75,80]。无论是直接观测还是理论计算,由于测量设备与实际凝结面之间的热学和物理性质存在较大差异,导致凝结水的测量一直存在

争议,这往往会导致对凝结水量的高估,也是某些地区日最大露珠量远超理论值的重要原因^[67]。为推动凝结水研究的发展,未来应致力于方法的统一与标准化,比如采用模型模拟与实地测量相结合的研究策略,构建一个全球性的协同观测体系,深入探究其形成过程^[81]。目前关于凝结水的研究还没有统一的方法,并且各种方法还存在一定的缺陷(表3)。

4.2 植被吸水过程同位素示踪与模型

稳定同位素技术的运用,在这个研究领域里被视为重要的突破。比如将受试植物置于用高丰度氘水配制的人工标记凝结水环境中进行浸润处理,通过比较处理组和对照组的植物叶水、根水及根际土壤水稳定氢同位素丰度差异,可以直接确定受试植物叶片是否具有吸水能力^[19]。Dawson^[12]借助同位素混合模型发现,北美红杉(*Sequoia sempervirens*)约19%的水分来自雾水,而刺羽耳蕨(*Polystichum munitum*)平均有66%的水分来自雾水,在干旱年份甚至可以达到100%依赖雾水维持生存。此外还可以借助多元线性混合模型估算植物木质部水分中各来源水分所占的相对比例^[83],实现了对不同水分来源吸收的量化。在各类模型中,IsoSource模型简单实用,但只能得出各水源的贡献范围,无法提供

表3 凝结水的主要测定方法及其优缺点

Tab. 3 Current methods measuring condensated water and their advantages and disadvantages

测定方法	优点	缺点	文献来源
Duvdevani法	成本低廉、操作简单,受蒸发影响小	得到的是凝结水量的估算值而非精确测量值且表面涂料易损坏	[65-66]
人造凝结面法	操作简单,材料价格便宜,便于比较不同位置的凝结水量	无法估算凝结速率和持续时间;不同收集器材料导致结果难以比较	[66]
Hlitner露水平衡仪法	可连续观测并记录凝结水量	成本高昂,易受风的影响;人造冷凝板与土壤表面的凝结作用存在差异	[66,70]
微型蒸渗仪法	直接测量凝结水量,准确性高,适用于多种表面,被视作测量凝结水量变化速率和凝结水总量的有效方法	易受外部环境干扰,对装置布置要求较高	[67,69,71]
Penman-Monteith公式法	既考虑空气动力学和辐射项的作用,又涉及作物的生理特征,被广泛用于估算凝结水	对环境条件的假设过于理想,实际条件常难以满足模型要求,导致模拟结果偏差	[68]
涡度相关法	能够进行高频采样,并提供连续、近乎实时的水通量数据	设备昂贵、操作复杂且维护成本高,夜间数据易被低估	[74,78]
地表能量平衡法	可基于常规气象数据估算露水,适用于长期数据序列分析	对数据质量要求高,误差来源多,可靠性较差	[68,73]
叶片湿度传感器	能够测量叶片凝结水的持续时间和凝结量变化	仅代表特定材质表面的露水量,可能与真实植被叶片或其他表面的凝结量存在差异	[5,72]
同位素标记法	能够确定凝结水的来源与去向,定量分析凝结水对植被水分的贡献	采样条件严苛,成本高昂难以实现持续监测	[82]

确定数值,因而存在较大的不确定性^[84]。Stock等^[85]基于R语言提出贝叶斯混合模型MixSIAR,该模型相较于IsoSource模型具有更好的水源区分能力,但其应用需要满足更严格的数据质量要求^[86]。同时,传统认为水分吸收无分馏,但实际情况中可能存在分馏现象,并且植物吸收水分的滞后性和水源的同位素动态变化导致定量结果的不确定性^[15]。

近年来,研究更加注重多技术联用与跨尺度融合,例如Yang等^[87]结合稳定同位素与树液流动方法,探究了半干旱区3个森林物种之间有效水分吸收的差异,并确定了这些过程与环境变量和植被特征之间的关系;Eller等^[11]通过多实验(荧光示踪剂实验、氦标记实验、叶片浸泡实验)结合逻辑函数模型和基于气象数据的预测模型,揭示了叶面吸水能力强的树种往往表现出非等水行为,往往更依赖雾事件维持水分平衡,因此依赖叶面吸水的树种例如巴西冬青(*Drimys brasiliensis*)可能因雾事件减少更易受干旱威胁。多种技术的综合运用,共同推动该领域从孤立的定性描述,向系统化机制解析与跨尺度动态模拟与预测的方向深入发展。

总的来说,NSAW研究已经从初期的定性观察逐步过渡到定量分析与过程研究的阶段。不同研究方法之间具有互补性。未来研究应着重于提高观测的时间连续性与空间代表性,完善模型参数化与验证体系,并在多源数据融合与跨尺度模拟方面形成统一框架,从而系统揭示NSAW在植被水分平衡与干旱区生态环境中的作用机制。

5 问题与展望

NSAW在维持植被水分平衡与缓解干旱胁迫中具有重要生态意义。尽管植物主要依赖根系吸收液态水,但在特定条件下(如高湿度、雾露环境),部分物种可通过叶片直接吸收利用NSAW,并参与植被水分补偿过程。NSAW对植被水分补偿机制研究虽取得重要进展,但其系统性局限仍制约着理论问题的深化与应用范围的拓展。首先,气态水吸收的量化难题尚未解决。目前对于植被直接吸收利用水蒸气的途径及调控机制的报道十分有限,尤其缺乏对吸收效率关键参数(如气孔响应阈值)的系统量化;其次,现有研究局限于干旱区单一物种,缺乏不同功能群系统响应NSAW的共性规律。目前研究

多集中在干旱区和半干旱区的荒漠植物和附生植物,且缺乏不同功能群间的系统比较,未来可以进一步拓展植物类型,明确不同补偿方式之间的联系以及同种补偿方式是否存在共性,以揭示不同植被或生态系统对NSAW的响应模式,为干旱区生态恢复的物种选育配置、退化生态系统的水分管理,以及气候变化下植被稳定性的评估等提供科学依据。最后,多尺度耦合模型开发滞后,叶片尺度观测的NSAW吸收参数(如单位叶面积吸露量)难以有效整合至生态系统尺度的水文通量模拟中。

基于现有研究的不足,本文认为未来研究重点在构建多技术协同的系统性框架,通过原位示踪技术揭示水汽相变吸收路径;开发多源数据融合系统,将卫星遥感获取的信息与地面传感器网络的数据结合起来,量化NSAW对植被水分平衡的长期影响;最终目标是建立一个融合生理-生态-水文过程的动态模型,揭示从叶片及根系吸水到区域水循环的多尺度互馈机制,为增强全球干旱地区生态系统的水分利用效率和适应能力提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 张亚峰,潘颜霞,霍建强,等.人工固沙植被系统生态水文研究进展[J].中国沙漠,2025,45(3):50-59. [Zhang Yafeng, Pan Yanxia, Huo Jianqiang, et al. Progress in ecohydrological studies of artificial sand-fixing vegetation systems[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(3): 50-59.]
- [2] 陈亚宁,李玉朋,李稚,等.全球气候变化对干旱区影响分析[J].地球科学进展,2022,37(2):111-119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dry-land areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111-119.]
- [3] 王诗雅,冯乃杰,项洪涛,等.水分胁迫对大豆生长与产量的影响及应对措施[J].中国农学通报,2020,36(27):41-45. [Wang Shiya, Feng Naijie, Xiang Hongtao, et al. Water stress: Effects on growth and yield of soybean and the countermeasures[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(27): 41-45.]
- [4] Haslam R, Borland A, Maxwell K, et al. Physiological responses of the CAM epiphyte *Tillandsia usneoides* L. (Bromeliaceae) to variations in light and water supply[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(6): 627-634.
- [5] 马波,田军仓,何进宇,等.宁夏中部干旱带露水形成机制及其对表层土壤水分的影响[J].水科学进展,2022,33(6):955-966. [Ma Bo, Tian Juncang, He Jinyu, et al. The mechanisms of dew formation and its influence on surface soil water content in the central Ningxia arid belt[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 955-966.]

- [6] 陈桢杰, 杨斌, 吴琦娇, 等. 稳定同位素技术在陆地生态系统雾水研究中的应用[J]. 环境生态学, 2024, 6(12): 40–46. [Chen Zhenjie, Yang Bin, Wu Qijiao, et al. Applications of stable isotope techniques in the study of fog water in terrestrial ecosystems[J]. Environmental Ecology, 2024, 6(12): 40–46.]
- [7] Kim H, Yang S, Rao S R, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight[J]. Science, 2017, 356(6336): 430–434.
- [8] 赵丽霞, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523–526. [Zhao Liying, Deng Xiping, Shan Lun. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 523–526.]
- [9] Fan X, Hao X M, Zhang S, et al. *Populus euphratica* counteracts drought stress through the dew coupling and root hydraulic redistribution processes[J]. Annals of Botany, 2023, 131(3): 451–461.
- [10] 潘颜霞, 张亚峰, 虎瑞. 吸湿凝结水对荒漠地区生物土壤结皮生态功能的影响综述[J]. 地球科学进展, 2022, 37(1): 99–109. [Pan Yanxia, Zhang Yafeng, Hu Rui. Review of the impacts of hygroscopic condensate on BSCs ecological function in desert areas [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(1): 99–109.]
- [11] Eller C B, Lima A L, Oliveira R S. Cloud forest trees with higher foliar water uptake capacity and anisohydric behavior are more vulnerable to drought and climate change[J]. New Phytologist, 2016, 211(2): 489–501.
- [12] Dawson T E. Fog in the California redwood forest: Ecosystem inputs and use by plants[J]. Oecologia, 1998, 117(4): 476–485.
- [13] Monteith J L. Dew: Facts and Fallacies[M]. Rutter A J, Whitehead F H. The water relations of plants. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1963: 37–56.
- [14] Hales S. Vegetable Staticks[M]. London, UK: Isaac Newton, 1727.
- [15] 于静洁, 李亚飞. 稳定氢氧同位素定量植物水分来源的不确定性解析[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 7942–7949. [Yu Jingjie, Li Yafei. Uncertainties in the usage of stable hydrogen and oxygen isotopes for the quantification of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7942–7949.]
- [16] Hayes M A, Chapman S, Jesse A, et al. Foliar water uptake by coastal wetland plants: A novel water acquisition mechanism in arid and humid subtropical mangroves[J]. Journal of Ecology, 2020, 108(6): 2625–2637.
- [17] 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.
- [18] Cassana F F, Eller C B, Oliveira R S, et al. Effects of soil water availability on foliar water uptake of *Araucaria angustifolia*[J]. Plant and Soil, 2016, 399(1): 147–157.
- [19] 李鹭辰, 桂子洋, 秦树高, 等. 毛乌素沙地4种典型植物叶片凝结水吸收能力及其水分生理响应[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 72–80. [Li Luchen, Gui Ziyang, Qin Shugao, et al. Foliar condensate absorption capacity of four typical plant species and their physiological responses to water in the Mu Us Sandy Land of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 72–80.]
- [20] Kidron G J, Starinsky A. Measurements and ecological implications of non-rainfall water in desert ecosystems—A review[J]. Ecohydrology, 2019, 12(6): e2121.
- [21] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269–276. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in Northwest China [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 269–276.]
- [22] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): 1–54.
- [23] Jackson I J. Climate, Water and Agriculture in the Tropics[M]. New York: Longman Inc, 1977.
- [24] Dorman C E, Hoch S W, Gulpepe I, et al. Large-scale synoptic systems and fog during the C-FOG field experiment[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2021, 181(2): 171–202.
- [25] Spirig R, Vogt R, Feigenwinter C. Droplet size distribution, liquid water content and water input of the seasonally variable, nocturnal fog in the Central Namib Desert[J]. Atmospheric Research, 2021, 262: 105765.
- [26] Price J D. On the formation and development of radiation fog: An observational study[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2019, 172(2): 167–197.
- [27] Ritter A, Regalado C M, Aschan G. Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): A combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(5): 920–935.
- [28] 何冰玉, 农柳蓬, 施跃进. 浅谈霜的形成和观测[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(增刊): 149. [He Bingyu, Nong Liupeng, Shi Yuejin. A brief discussion on the formation and observation of frost[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2009, 30 (Suppl.): 149.]
- [29] Gui Z, Li L, Qin S, et al. Foliar water uptake of four shrub species in a semi-arid desert[J]. Journal of Arid Environments, 2021, 195: 104629.
- [30] Pina A L C B, Zandavalli R B, Oliveira R S, et al. Dew absorption by the leaf trichomes of *Combretum leprosum* in the Brazilian semi-arid region[J]. Functional Plant Biology, 2016, 43(9): 851–861.
- [31] Martorell C, Ezcurra E. The narrow-leaf syndrome: A functional and evolutionary approach to the form of fog-harvesting rosette plants[J]. Oecologia, 2007, 151(4): 561–573.
- [32] Arnold R, Haug J K, Lange M, et al. Impact of forest cover change on available water resources: Long-term forest cover dynamics of the semi-arid Dhofar cloud forest, Oman[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 299.

- [33] Wang L, Kaseke K F, Seely M K. Effects of non-rainfall water inputs on ecosystem functions[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, 4(1): e1179.
- [34] 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(2): 229–242.
- [35] Limm E B, Simonin K A, Bothman A G, et al. Foliar water uptake: A common water acquisition strategy for plants of the redwood forest[J]. *Oecologia*, 2009, 161(3): 449–459.
- [36] Berry Z C, Emery N C, Gotsch S G, et al. Foliar water uptake: Processes, pathways, and integration into plant water budgets[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(2): 410–423.
- [37] Kagawa A. Foliar water uptake as a source of hydrogen and oxygen in plant biomass[J]. *Tree Physiology*, 2022, 42(11): 2153–2173.
- [38] Gong X W, Lü G H, He X M, et al. High air humidity causes atmospheric water absorption via assimilating branches in the deep-rooted tree *Haloxylon ammodendron* in an arid desert region of Northwest China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 573.
- [39] Berry Z C, Smith W K. Ecophysiological importance of cloud immersion in a relic spruce-fir forest at elevational limits, southern Appalachian Mountains, USA[J]. *Oecologia*, 2013, 173(3): 637–648.
- [40] 陈玉, 贾剑波, 颜成正, 等. 干旱胁迫下杉木叶片吸水及水分逆向运移特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(9): 2091–2099. [Chen Yu, Jia Jianbo, Yan Chengzheng, et al. Characteristics of leaf water absorption and water reverse transport in *Cunninghamia lanceolata* under drought stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(9): 2091–2099.]
- [41] Oliveira R S, Eller C B, Bittencourt P R L, et al. The hydroclimatic and ecophysiological basis of cloud forest distributions under current and projected climates[J]. *Annals of Botany*, 2014, 113(6): 909–920.
- [42] Schreel J D M, von der Crone J S, Kangur O, et al. Influence of drought on foliar water uptake capacity of temperate tree species [J]. *Forests*, 2019, 10(7): 562.
- [43] Wang X H, Xiao H L, Cheng Y B, et al. Leaf epidermal water-absorbing scales and their absorption of unsaturated atmospheric water in *Reaumuria soongorica*, a desert plant from the northwest arid region of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 128: 17–29.
- [44] 桂子洋, 秦树高, 胡朝, 等. 毛乌素沙地两种典型灌木叶片凝结水吸收能力及吸水途径[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 583–593. [Gui Ziyang, Qin Shugao, Hu Zhao, et al. Foliar condensate absorption and its pathways of two typical shrub species in the Mu Us Desert[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(6): 583–593.]
- [45] Guzmán-Delgado P, Laca E, Zwieniecki M A. Unravelling foliar water uptake pathways: The contribution of stomata and the cuticle [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(6): 1728–1740.
- [46] Caird M A, Richards J H, Donovan L A. Nighttime stomatal conductance and transpiration in C₃ and C₄ plants[J]. *Plant Physiology*, 2007, 143(1): 4–10.
- [47] Brewer C A, Smith W K, Vogelmann T C. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1991, 14(9): 955–962.
- [48] Schönherr J, Bukovac M J. Penetration of stomata by liquids: Dependence on surface tension, wettability, and stomatal morphology [J]. *Plant Physiology*, 1972, 49(5): 813–819.
- [49] Ganong W F. On the absorption of water by the green parts of plants[J]. *Botanical Gazette*, 1894, 19(4): 136–143.
- [50] 楼靓璐, 宋新山, 赵晓祥. 苗期大豆对土壤水分和空气湿度变化的生理生化响应[J]. *草业科学*, 2013, 30(6): 898–903. [Lou Liangju, Song Xinshan, Zhao Xiaoxiang. Response of physiology and biochemistry of soybean seedling to soil water deficit and air humidity[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(6): 898–903.]
- [51] Vesala T, Sevanto S, Grönholm T, et al. Effect of leaf water potential on internal humidity and CO₂ dissolution: Reverse transpiration and improved water use efficiency under negative pressure[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 54.
- [52] Schreel J D M, Steppe K. Foliar water uptake in trees: Negligible or necessary?[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(6): 590–603.
- [53] Fischer D T, Still C J, Ebert C M, et al. Fog drip maintains dry season ecological function in a California coastal pine forest[J]. *Ecosphere*, 2016, 7(6): e01364.
- [54] 郭占荣, 韩双平. 西北干旱地区凝结水试验研究[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 623–628. [Guo Zhanrong, Han Shuangping. Experimental study on the condensation water in arid area, Northwestern China[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 623–628.]
- [55] Uclés O, Villagarcía L, Cantón Y, et al. Partitioning of non rainfall water input regulated by soil cover type[J]. *Catena*, 2016, 139: 265–270.
- [56] Zhang Q, Wang S, Wang S S, et al. Influence factors and variation characteristics of water vapor absorption by soil in semi-arid region [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(11): 2240–2251.
- [57] Zhu S G, Chen H S, Zhang X X, et al. Incorporating root hydraulic redistribution and compensatory water uptake in the common land model: Effects on site-level and global land modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(14): 7308–7322.
- [58] Nadezhdina N, David T S, David J S, et al. Trees never rest: The multiple facets of hydraulic redistribution[J]. *Ecohydrology*, 2010, 3(4): 431–444.
- [59] Neumann R B, Cardon Z G. The magnitude of hydraulic redistribution by plant roots: A review and synthesis of empirical and modeling studies[J]. *New Phytologist*, 2012, 194(2): 337–352.
- [60] 杨贵森, 黄磊, 杨利贞, 等. 植物根系水力再分配量及影响因素分析[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1411–1419. [Yang Guisen, Huang Lei, Yang Lizhen, et al. Analysis of the magnitude and influencing factors of the hydraulic redistribution of plant roots[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5): 1411–1419.]
- [61] Wei L, Qiu Z, Zhou G, et al. Soil water hydraulic redistribution in a subtropical monsoon evergreen forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155437.

- [62] Lee E, Kumar P, Barron-Gafford G A, et al. Impact of hydraulic redistribution on multispecies vegetation water use in a semiarid savanna ecosystem: An experimental and modeling synthesis[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(6): 4009–4027.
- [63] Wang Y Y, Jia B H, Xie Z H. Impacts of hydraulic redistribution on eco-hydrological cycles: A case study over the Amazon basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(9): 1330–1340.
- [64] Gao Z, Shi W, Wang X, et al. Response of dew and hydraulic redistribution to soil water in a rainfed dryland jujube plantation in China's Hilly Loess Region[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 107786.
- [65] Duvdevani S. An optical method of dew estimation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1947, 73(317–318): 282–296.
- [66] Kidron G J. A simple weighing method for dew and fog measurements[J]. *Weather*, 1998, 53(12): 428–433.
- [67] Li H Y, Han C T, Yang Y, et al. Formation and variations of dew and hoarfrost in the Hulu Catchment on Northeast Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 42: 101179.
- [68] Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Wichink Kruit R J, et al. Contribution of dew to the water budget of a grassland area in the Netherlands[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(3): 446–455.
- [69] Guo B, Chen Y N, Li W H, et al. An experimental study of dew deposition on different types of underlying surfaces in the lower reaches of the Tarim River, northwestern China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(1): 30–38.
- [70] 王忠静, 张子雄, 索滢. 干旱区凝结水评估及对水量平衡方程影响[J]. *水利学报*, 2019, 50(6): 710–720. [Wang Zhongjing, Zhang Zixiong, Suo Ying. A new water balance equation introducing dew amount in arid area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(6): 710–720.]
- [71] Feng T J, Zhang L X, Chen Q, et al. Dew formation reduction in global warming experiments and the potential consequences[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125819.
- [72] Guo X, Wang Y, Yan H, et al. Dew/hoarfrost on the canopies and underlying surfaces of two typical desert shrubs in Northwest China and their relevance to drought[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127880.
- [73] Beysens D, Muselli M, Nikolayev V, et al. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas[J]. *Atmospheric Research*, 2004, 73(1–2): 1–22.
- [74] 郭晓楠, 查天山, 贾昕, 等. 典型沙生灌木生态系统凝结水量估算[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 80–87. [Guo Xiaonan, Zha Tianshan, Jia Xin, et al. Estimation of dewfall amount in a typical desert shrub ecosystem[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(10): 80–87.]
- [75] Vermeulen A T, Wyers G P, Römer F G, et al. Fog deposition on a coniferous forest in the Netherlands[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(3): 375–386.
- [76] Moro M J, Were A, Villagarcía L, et al. Dew measurement by Eddy covariance and wetness sensor in a semiarid ecosystem of SE Spain [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3–4): 295–302.
- [77] 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.
- [78] Groh J, Pütz T, Gerke H H, et al. Quantification and prediction of nighttime evapotranspiration for two distinct grassland ecosystems [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(4): 2961–2975.
- [79] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1951, 8(3): 135–145.
- [80] Li Y, Riedl A, Eugster W, et al. The role of radiative cooling and leaf wetting in air-leaf water exchange during dew and radiation fog events in a temperate grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 328: 109256.
- [81] 冯天骄, 张智起, 张立旭, 等. 干旱半干旱区生态系统凝结水的影响因素及其作用研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 456–468. [Feng Tianjiao, Zhang Zhiqi, Zhang Lixu, et al. Review on the influencing factors and functions of condensed water in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 456–468.]
- [82] 徐莹莹, 阎百兴, 王莉霞. 三江平原露水水汽来源的氢氧稳定同位素辨析[J]. *环境科学*, 2011, 32(6): 1550–1556. [Xu Yingying, Yan Baixing, Wang Lixia. Discrimination of vapour sources of dew in Sanjiang Plain by stable isotopic technique[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(6): 1550–1556.]
- [83] 陈燕, 杨慧, 宁静, 等. 重度干旱条件下典型岩溶区植被恢复过程中植物水分利用来源和效率研究[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(10): 1534–1543. [Chen Yan, Yang Hui, Ning Jing, et al. Plant water use sources and efficiency during vegetation restoration in typical Karst Area under severe drought conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(10): 1534–1543.]
- [84] 郭飞, 马娟娟, 郑利剑, 等. 基于氢氧同位素的植物水源区分方法比较[J]. *节水灌溉*, 2015, 40(11): 59–63. [Guo Fei, Ma Juanjuan, Zheng Lijian, et al. Comparison of plant water sources partitioning methods using hydrogen and oxygen isotope[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015, 40(11): 59–63.]
- [85] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. *PeerJ*, 2018, 6: e5096.
- [86] 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1356–1368. [Zhang Yu, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1356–1368.]
- [87] Yang Q, Fan J, Xing Y Z, et al. Water use strategies for three dominant tree species in pure plantations of the semi-arid Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 654: 132844.

Research progress on moisture compensation of near-surface atmospheric water for vegetation and its quantification in arid environments

YANG Yan¹, ZHANG Weijiang^{1,2}, MA Ting¹, WANG Lei¹, MA Bo^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Near-surface atmospheric water (NSAW) serves as an important hidden water source in arid-zone ecosystems, where its role in mediating water compensation is key to alleviating vegetation water stress amid the increasing frequency of extreme droughts driven by climate change. However, the compensation process, underlying mechanisms, weighting schemes, and quantification methods associated with NSAW and vegetation water remain to be further clarified. Therefore, this paper reviews the research progress on the hydrological processes and functional mechanisms of NSAW, the compensation mechanisms of NSAW for vegetation and soil moisture, and the quantification methods for phase transformation of NSAW. Existing research findings indicate that vegetation can absorb and utilize NSAW water through stomata, cuticles, or specialized structures, and this pathway predominantly governs the process by which vegetation acquires NSAW water. NSAW water is absorbed or liquefied by the soil, indirectly regulating vegetation water content through the hydraulic redistribution (HR) process of the root system and thereby establishing a new moisture balance. Dynamic observations of NSAW, along with high-precision analysis of water sources, have been achieved through the integration of micrometeorological monitoring and stable isotope technology. This approach contributes significantly to the quantification and simulation of phase transformations in the field of NSAW. Nevertheless, reaching a consensus on the quantification of NSAW phase transformation remains challenging owing to the lack of parameters related to the physical properties of materials, particularly thermodynamic parameters. This deficiency results in an absence of data on the efficiency of leaf absorption of gaseous water, as well as a shortage of multiscale coupling models. In conclusion, this review posits that future investigations should focus on achieving breakthroughs in the coupling effects of NSAW and carbon assimilation, the development of collaborative monitoring technologies utilizing multisource data, and the construction of multiscale dynamic models. These advancements are expected to provide a theoretical foundation for the efficient utilization of water resources under arid conditions.

Keywords: near-surface atmospheric water; leaf water uptake; water compensation; hydraulic redistribution