

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.

# 人工固沙植被系统生态水文研究进展

张亚峰,潘颜霞,霍建强,张志山

(中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室/沙坡头沙漠研究试验站,甘肃兰州 730000)

**摘要:** 植物固沙是干旱沙区防沙治沙与生态修复的重要手段。人工固沙植被的建立和演替重塑了植被-土壤系统水循环过程和水量平衡格局,而水文过程反过来调控植被群落的结构、功能及其生态稳定性。本文系统梳理了人工固沙植被系统生态水文研究的主要进展:(1)固沙植被-土壤系统关键水文过程与水量平衡演变规律,聚焦冠层水文过程、土壤水文过程和蒸散发;(2)水文过程驱动植物生长、植被结构与功能响应,聚焦植物水分利用与调控、水力调节机制、凝结水生态水文效应及土壤水分的植被承载力。未来亟需加强多尺度观测、多过程耦合模型构建与关键生态水文阈值确定,为干旱区以水定绿科学治沙提供理论支撑。

**关键词:** 干旱沙区; 固沙植被; 生态水文; 水量平衡; 植物水分关系

文章编号: 1000-694X(2025)03-050-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00049

中图分类号: S715.5

文献标志码: A

## 0 引言

中国荒漠化面积大、受影响人口最多、风沙危害严重。根据第六次全国荒漠化和沙化调查结果,截至2019年,中国荒漠化土地面积为25 737.13万 $\text{hm}^2$ ,沙化土地面积为16 878.23万 $\text{hm}^2$ ,分别占国土面积的26.81%和17.58%<sup>[1]</sup>。长期治沙实践中,植物固沙已被证明是干旱沙区遏制风沙危害的重要手段和有效途径,也是打好“三北”工程攻坚战的关键措施<sup>[2-3]</sup>。

始建于20世纪50年代中期的沙坡头人工固沙植被体系,不仅保障了包兰铁路自通车以来的安全运行,也成为全球交通干线沙漠治理和生态恢复的典范,为遵循沙地水循环规律和植被地带性分布的人工植被建设提供了科学范例<sup>[4]</sup>。人工植被系统的建立使流动沙丘逐渐演变为固定植被景观,这一地表景观格局的改变重塑了区域水循环模式和水量平衡;同时,水分是干旱生态系统的驱动力和关键限制因子,水文过程调控植被群落演替方向与空间格局,决定人工植被系统的稳定性<sup>[5-6]</sup>。

中国科学院沙坡头沙漠研究试验站(简称沙坡头站)作为沙漠生态系统国家野外科学观测研究

站,自1955年建站以来,通过近70年多学科交叉研究,系统揭示了干旱沙区人工固沙植被系统生态-水文过程互馈机制和植物适应的生理生态机制,形成了特色鲜明的人工固沙植被系统生态水文研究体系。尽管生态水文学兴起于20世纪90年代,沙坡头站科研人员早在50年代建立包兰铁路沙坡头地区固沙植被防护体系时,以固沙植物种选择和配置治沙实践需求为牵引,前瞻性地开展了土壤水分动态和植物-水分关系研究<sup>[7-11]</sup>,取得了一系列重要研究成果<sup>[12]</sup>。20世纪90年代在人工固沙植被区水循环和水量平衡方面开展了大量研究,扩展了研究的深度和广度<sup>[13-18]</sup>。21世纪以来,沙坡头站生态水文研究向多尺度、跨学科及综合集成方向发展,水循环和水量平衡及植物-水分关系研究更加系统化,植被与水互馈研究成为重点,生物土壤结皮生态水文效应受到重视,模型方法广泛使用<sup>[19]</sup>。相关研究丰富了干旱区生态水文学理论体系,为中国西部生态安全屏障建设提供重要科学支撑。本文系统梳理了21世纪以来沙坡头站在人工固沙植被系统生态水文研究方面的主要进展,重点从两个维度阐述:其一,固沙植被-土壤系统关键水文过程与水

收稿日期:2025-04-07; 改回日期:2025-05-11

资助项目:国家自然科学基金项目(U23A20223,32471969,32301314)

作者简介:张亚峰(1986—),男,甘肃甘谷人,副研究员,主要从事干旱区生态水文学研究。E-mail: zhangyafeng@lzb.ac.cn

量平衡演变规律,聚焦冠层水文过程、土壤水文过程和蒸散发;其二,水文过程驱动的植物生长、植被结构与功能响应,聚焦植物水分利用与调控、水力调节机制、凝结水生态水文效应及土壤水分的植被承载力,以期在干旱区以水定绿的生态恢复实践提供科学依据。

## 1 固沙植被-土壤系统关键水文过程与水量平衡变化

### 1.1 固沙植被冠层水文过程

大气降水通常是干旱区主要的水分输入源,其通过植被冠层再分配为冠层截留损失(冠层截留的部分降水在降水期间及结束之后通过蒸发返回大气)、穿透雨(直接通过冠层空隙滴落或间接通过冠层构件滴落或溅落)和树干茎流(沿茎干向下流动进入根区的降水)3个组分,极大地改变了降水在植被区水平和垂直方向时空分布格局<sup>[20-21]</sup>。3组分通量均可看作是降水特性、气象因子和植物形态学属性的函数<sup>[22-25]</sup>。对沙坡头人工植被区典型固沙灌木柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)冠层降水再分配长期野外观测发现,柠条冠层截留损失占同期降水的比例(16.8%),显著低于油蒿(22.4%),而其树干茎流比例(9.0%)显著高于油蒿(2.8%);二者穿透雨比例无显著差异,分别为74.3%和74.8%<sup>[26]</sup>。这表明柠条比油蒿具有更高的树干茎流生产效率和更低的冠层截留损失。该差异与两种灌木形态特征紧密相关:柠条主干光滑,叶片呈卵圆形且具有蜡质层,有助于降低冠层截留损失并提高树干茎流产量;相比之下,油蒿皮厚、质地松软粗糙且不连续地斜向开裂,同时其具有大量柔软的小枝和呈簇状、针叶型叶,这些特征有助于增强冠层截留能力,使更多潜在可形成树干茎流的降水被截持<sup>[26-28]</sup>。

冠层持水力反映了植物冠层对降水的截持能力,是控制降水截留及其他与冠层有关生态水文过程(如树干茎流和穿透雨)的关键参数<sup>[29-31]</sup>,随植物种和降水特性而变化。人工降水模拟试验表明,冠层持水力随降水强度增加<sup>[32]</sup>和雨滴直径减小<sup>[33]</sup>而增强;此外,叶面积和叶面积指数通常是较好的预测变量,冠层持水量随叶面积及叶面积指数增加而线性递增<sup>[32]</sup>。柠条冠层单位叶面积持水量(0.39 mm)明显低于油蒿冠层(0.61 mm)<sup>[32]</sup>。

穿透雨在灌木非均质冠层下方表现出高度的空间变异性和良好的时间稳定性<sup>[34-35]</sup>。具体而言,同一方位上,穿透雨量随距主干距离增加而显著线性递增;不同方位上,其空间分布受降水期间主风向影响显著,灌木主风向侧穿透雨量显著高于背风向侧<sup>[34-35]</sup>,即灌木雨影效应<sup>[36]</sup>。这种空间分异模式在不同降水事件中较为稳定<sup>[35,37]</sup>。长期来看,穿透雨空间变异性和时间稳定性叠加效应可能影响灌丛区局地土壤水分空间分布,形成土壤水分的热点和冷点<sup>[34,38]</sup>。此外,在离散降水事件中,穿透雨产生通常存在一定时间滞后,其产生后与降水过程表现出较好的时间同步性,但其结束时间有可能早于也可能滞后于降水<sup>[34]</sup>。

树干茎流在降水再分配中占比通常最小,但由于其在植物地上和地下部分运动表现出双漏斗效应<sup>[39-40]</sup>,且降水对植物冠层具有冲刷效应,使得富含养分的部分降水高度汇聚至根区,成为水分受限环境下植物的重要水分和养分来源<sup>[41-43]</sup>。全球尺度上,树干茎流产量的中位值约为2.7%,灌木树干茎流产量(中位数7.2%)显著高于乔木(中位数2.4%)<sup>[44]</sup>。树干茎流存在降水阈值,需要冠层达到一定湿润后方可形成。基于树干茎流量和降水量线性拟合关系,推算柠条和油蒿树干茎流产生的降水阈值分别为1.3 mm和2.2 mm,与灌木产生树干茎流所需的降水阈值吻合(中位值1.7 mm;四分位距:1.1~2.6 mm)<sup>[24]</sup>。野外高频监测发现,降水的时间异质性能较好地反映树干茎流输入到土壤的时间动态;降水发生后,树干茎流形成存在一定时滞,且降水峰值和树干茎流峰值之间亦存在时间延滞,即便降水结束后1 h内,仍可观测到少量树干茎流<sup>[45]</sup>。目前树干茎流研究主要基于野外观测,几乎均在局地尺度(个体或小样方),限制了对生态系统尺度生态水文效应的评估,是目前该领域研究面临的困境和难点,构建生态水文模型模拟可能是解决该问题的可行手段。Chen等<sup>[46]</sup>通过耦合水量平衡与植被生长的生态水文模型模拟结果发现,在降水低于600 mm的干旱区,树干茎流对植被生长具有明显的正向调控作用。

### 1.2 固沙植被区土壤水文过程

在沙坡头地区,降水对流动沙丘沙层的补给作用较为有限,其中对表层至3.4 m深度沙层稳定贮水量补给占年平均降水量的10.5%,补给至稳定湿

沙层或渗入沙层深处的比例为16.6%<sup>[11]</sup>。固沙植被建立对降水入渗和深层渗漏具有抑制作用<sup>[47-48]</sup>,有效减少了入渗深度和深层渗漏,在生物土壤结皮(特别是藓类和地衣结皮)覆盖区域抑制效应尤为明显<sup>[49-50]</sup>。生物土壤结皮的结构特性(特别是多孔性、团聚体稳定性以及水分进入土壤的路径弯曲性)是影响土壤水文过程的主要因素,导致更多降水滞留于土壤表层<sup>[51]</sup>。沙坡头固沙植被区植物群落全年均未监测到土壤水分深层渗漏,表明植物根系能有效吸收土壤水分,从而阻止深层渗漏发生。相比之下,无植被覆盖的流沙区域,深层渗漏量占同期降水量的27%<sup>[52-53]</sup>。由此可见,固沙植被通过改变土壤水分入渗和利用,对土壤水分平衡及地下水补给具有深远影响。

固沙植被建立后,土壤水分的长期变化可分为4个阶段:①植被建立初期,土壤含水量与降水分布密切相关;②9~10年后,土壤水分因植被利用而迅速下降,浅层土壤由于生物土壤结皮的拓殖持水能力增强,深层土壤含水量降低<sup>[6,49,54-56]</sup>;③40~48年,土壤水分稳定在较低水平;④48年后,深层土壤水分与降水分布再次显著相关,除了灌木盖度降低外,土壤动物活动也对深层土壤水分稳定和恢复起到关键作用<sup>[49,57]</sup>。

固沙植被区蚂蚁营巢活动和灌木自集水作用在一定程度上改变土壤水的空间分布,对降水入渗产生正反馈。沙丘固定后蚁穴密度随固沙区年限增加而增加,蚁穴大量存在一定程度上干扰了生物土壤结皮对降水的截持作用,使部分降水通过蚁穴这一优先通道对深层土壤水分渗透至深层土壤,从而对深层水分形成一定补给<sup>[57]</sup>。灌木个体具有很强的自集水特性,如柠条和油蒿树干茎流汇流效率分别高达82和22,即灌木通过树干茎流水分汇流作用,使进入基部土壤的降水量远高于裸地,这部分水分可沿植物根系或土壤大孔隙等通道优先快速入渗进入较深层土壤,对降水后灌丛下方土壤剖面含水量和湿润锋的野外观测证实了灌木强大的自集水能力<sup>[28,42,58]</sup>。

土壤水的空间分布和时间动态受降水模式、土壤质地、植被覆盖和地形等多种因素的影响。特别是在人工固沙植被区,土壤水的垂直分布随着植被演替而发生变化<sup>[59-61]</sup>,其中生物土壤结皮的形成和发育具有重要影响<sup>[54]</sup>。此外,土壤水的时间稳定性分析表明,相较于表层土壤,深层土壤水分

的时间稳定性更高<sup>[62-63]</sup>,这表明深层土壤水分变化可作为长期生态水文过程的重要指示变量。

### 1.3 固沙植被区蒸散发

蒸散发是陆地生态系统水量平衡和水循环的关键组成部分,也是干旱沙区最主要的水分散失途径<sup>[64]</sup>。对固沙植被群落蒸散发的定量研究,是干旱区生态水文学主要的研究热点和前沿科学问题。蒸渗仪是最普遍和最直接用于测量蒸散发的主要手段和方法<sup>[65-66]</sup>。基于大型称重式蒸渗仪长达18年的监测表明年际尺度上人工固沙植被区柠条和油蒿群落蒸散发量和年降水量线性拟合关系的斜率接近1,说明降水基本通过蒸散发消耗殆尽;月尺度上,降水与蒸散发表现出动态平衡,即月降水量较小,蒸散发量高于降水,表现出土壤水分匮乏,月降水量较大,蒸散发量低于降水;日尺度上,蒸散发量随降水量变化表现出脉冲效应<sup>[64]</sup>。土壤蒸发主要受环境因子(温度、降水等)、植被特征(植被盖度和发育)、土壤质地(黏粉粒和砂粒)以及土壤覆盖物(藻类、地衣和苔藓等不同类型生物土壤结皮)等的影响<sup>[64,67-68]</sup>。固沙植被区土壤蒸发受降水量刚性约束,降水事件后土壤蒸发占比显著升高,并与降水量存在高度正相关,尤以夏季高温时期最为明显<sup>[53,68]</sup>。干旱沙区人工植被呈现稀疏的斑块状分布,灌丛遮阴对土壤蒸发的影响较为有限<sup>[68]</sup>。

人工固沙植被区生物土壤结皮的形成与发育对土壤蒸发过程具有阶段性影响,并表现出对降水的依赖性:当降水<7.5 mm时,生物土壤结皮对土壤蒸发具有抑制作用,而当降水>10 mm时,其促进蒸发<sup>[69]</sup>。土壤蒸发过程可分为3个阶段:①蒸发速率稳定阶段,即土壤水分饱和时的高蒸发速率阶段;②蒸发速率下降阶段,即土壤水分趋于非饱和状态,蒸发速率逐渐降低;③水汽扩散阶段,即土壤水分主要通过扩散作用进入大气<sup>[70]</sup>。不同类型生物土壤结皮土壤蒸发过程具有一定差异,与流沙相比,藻类结皮和藓类结皮可维持较长时间的稳定蒸发速率,即生物土壤结皮由于其较高的持水能力而维持较高的蒸发<sup>[70-71]</sup>;但是,在蒸发速率下降阶段,生物土壤结皮土壤蒸发小于流沙<sup>[69]</sup>。

植物蒸腾是土壤水分进入大气中的另一主要途径,也是土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统中的关键环节<sup>[72]</sup>。不同荒漠植物蒸腾速率具有较大差异,例如,油蒿的蒸腾速率普遍高于柠条,珍珠



(*Salsola passerina*)的蒸腾速率显著高于红砂(*Reaumuria soongorica*)<sup>[70,73]</sup>。此外,植物年龄也影响蒸腾特性,例如,老龄柠条的蒸腾速率显著低于幼龄柠条,但其水分利用效率更高<sup>[74]</sup>。除植物种本身的生理特性,人工植被的蒸腾速率还受环境因子(尤其是土壤含水量)的影响。土壤水分条件较好时,柠条、油蒿及红砂的日蒸腾速率变化呈现双峰曲线;而在干旱条件下,其蒸腾变化则呈现单峰曲线,且峰值出现时间提前<sup>[68,75-76]</sup>。此外,群落特征(物种组成)亦会影响同一物种的蒸腾速率,如在柠条-油蒿混交林中,二者的蒸腾速率均显著低于各自纯林<sup>[68]</sup>。因此,在植物蒸腾尺度转化过程中,应充分考虑植被群落的结构特征。干旱荒漠生态系统由于植被生长缓慢,其叶面积指数和有效盖度可较为准确地用于尺度转化<sup>[69]</sup>。总之,固沙植被区蒸散发年际变化主要受降水驱动<sup>[52-53]</sup>,植物蒸腾年际变化对蒸散发的贡献仍需进一步定量研究。

## 2 水文过程驱动的植物生长、植被格局与功能响应

### 2.1 植物水分利用与调控

灌木对水分利用既是决定个体存活的关键生理机制,更是塑造种间互作网络与群落结构演替的核心驱动力。干旱沙区不同功能群及不同生活史类型植物的水分利用模式在空间和时间上存在差异,实现了有限水资源的生态位分割与协同利用。精确解析植物水分来源是揭示植物适应性策略与水分利用模式的关键切入点和主要研究内容<sup>[77-78]</sup>。

目前,氢( $\delta D$ )氧( $\delta^{18}O$ )稳定同位素分析已成为研究植物水分来源的主要手段,被广泛应用于干旱区生态水文学研究<sup>[79]</sup>。干旱区植物利用的水分主要来源于降水,对沙坡头固沙植被区降水的水分来源差异和变化研究表明,降水的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值具有显著的季节变化特征,冬季最小而夏末秋初最大<sup>[80]</sup>。不同年限固沙植被区土壤水 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 在不同深度差异明显,表层(0~20 cm)呈增加趋势,深层则逐渐降低,固沙植被区年限越长,该趋势越明显<sup>[80]</sup>。植物通过根系吸收土壤水分,并经木质部向叶片运输以支持蒸腾与光合碳同化。一般情况下,木质部水分传输过程不会引起 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 分馏<sup>[77,81]</sup>。因此,木质部水分的稳定同位素特征可用于溯源植物利用水分来源。柠条和油蒿在旱季和雨季的水分利用

方式不同,雨季时两种植物对浅层(0~100 cm)土壤水分利用趋同性增加,浅层水分贡献率随固沙年限增加呈显著递减趋势;而在干旱时,二者呈现显著的水分生态位分异,浅根系油蒿主要依赖浅层土壤水分,而深根系柠条则主要利用深层土壤水分,这种水分利用的时空互补随生态系统演替(固沙年限增加)而愈加明显<sup>[82-83]</sup>。

干旱区植物水分利用效率是决定其生长和生存的关键特征。柠条的水分利用效率随干旱程度加剧而提升,这表明即便在干旱胁迫下,柠条仍能保持部分气孔开放以维持光合作用,属于异水调节植物<sup>[84]</sup>。植物年龄也影响其水分利用效率,幼龄柠条的水分利用效率显著低于老龄柠条,这是由于幼龄植物优先分配地下生物量以吸收更多水分,而老龄植物根系达到一定程度后采用保守的水分利用策略<sup>[74,85]</sup>。此外,干旱季节灌木可通过根系水力再分配将湿润层土壤水向上或根区迁移,从而缓解浅层水分竞争,优化土壤中水分资源的分配,提高整体水分利用效率<sup>[86]</sup>。

### 2.2 凝结水生态水文效应

当地表温度等于或低于露点温度时,空气中水蒸气与地表接触形成凝结水,凝结水作为一种额外的水分补给形式,在干旱半干旱地区固沙植被生态系统中具有显著的生态水文效应,不仅直接参与土壤水分循环,还间接影响植被生长、繁殖以及生态系统功能<sup>[87]</sup>。因此,深入研究凝结水在固沙植被区的生态水文效应,对于理解和管理脆弱生态系统的水资源具有重要的科学价值和实践意义。

无降水条件下,固沙植被区土壤表层水分增加不仅源于传统意义上凝结水生成,还受吸湿过程影响,在土壤含水量极低的情况下,水分吸附作用先于凝结作用发生,即产生吸湿凝结水<sup>[88]</sup>。来源于大气吸湿凝结水占总量的92%,其影响深度主要在土壤表层0~3 cm<sup>[13]</sup>,而5~30 cm仍可观测到吸湿凝结水,但数量显著减少<sup>[89]</sup>。在沙坡头人工固沙植被区,一年中有42.1%的天数可观测到吸湿凝结水,其形成量约相当于降水量的10%<sup>[88]</sup>。植被演替和生物土壤结皮形成显著影响吸湿凝结水形成过程,生物土壤结皮表层吸湿凝结水形成量和形成间期均显著高于流沙<sup>[88,90-93]</sup>。植被微生境也影响吸湿凝结水的形成,植物冠层下方土壤的吸湿凝结量小于裸地,但其形成间期较长<sup>[88,93]</sup>。

吸湿凝结水对土壤水分动态的影响主要体现在表层水分的维持。固沙植被区夜间生成的吸湿凝结水在日间主要参与土壤蒸发过程,对土壤水分储量贡献有限,但其显著减缓了表层水分的日间蒸发,维持表层含水量,防止其在干旱季节过度下降<sup>[94]</sup>。

吸湿凝结水对固沙植被区植物生长具有促进作用。生物土壤结皮叶绿素含量与吸湿凝结水生成量呈正相关,表明吸湿凝结水对生物土壤结皮的生长具有重要影响<sup>[94]</sup>。固沙植物能够通过叶片直接吸收凝结水,例如非降水对固沙植物油蒿水分来源的贡献率为8%~16%,且在干旱条件下该比例更高<sup>[95]</sup>。

吸湿凝结水对生物土壤结皮和植物光合作用具有显著的延长作用,尤其在干旱环境下,这一过程对于维持生物光合碳同化至关重要<sup>[88]</sup>。生物土壤结皮中光合生物体表现出适应干旱环境的机制<sup>[96]</sup>,即使在夜间低温和黑暗条件下,其光系统II(PSII)活性仍能保持一定水平。清晨生物土壤结皮表层的吸湿凝结水为光合作用提供了数小时的水分供应,在较低的光照和温度条件下促进净光合作用。这种由吸湿凝结水触发的PSII活性迅速提升机制,可能是生物土壤结皮光合生物体适应干旱环境的关键生存策略。因此,吸湿凝结水不仅通过调节植物水分状况促进其生长,还通过优化光合作用过程,提高植物在极端干旱环境下的生存能力。

### 2.3 固沙灌木的水力调节机制

SPAC系统中,根系吸水是植物体维持水分平衡的基石,控制着植物体内水分传输的通量<sup>[97]</sup>;茎干导水是水分传输的重要枢纽,决定了地上部分的生长发育;叶片蒸腾失水是水分传输的终端,调控了植物物质代谢与能量转换<sup>[72]</sup>。然而,干旱胁迫能导致植物木质部发生空穴栓塞,破坏木质部水分传输的连续性,从而影响植物体各器官间的水分平衡。对沙坡头站同质园35种灌木和乔木植物的功能性状研究表明,荒漠植物的水力阈值范围较宽,表现出相对较高的水力安全性和较低的木质部导水性,其生存主要取决于水力安全性和生长速率<sup>[98]</sup>。此外,对8种荒漠灌木叶片水力功能性状的研究表明,不同物种在相同生境下并未表现出趋同的水力功能特性;同时,叶片最小日水势与叶片水

力效率呈权衡关系,但与叶片水力安全性相协调,这表明叶片最小日水势可用于初步预测荒漠灌木叶片导水率和抗栓塞性<sup>[84]</sup>。压力-体积(P-V)曲线广泛用于测量植物水分状况和水势组成<sup>[99]</sup>。基于P-V曲线对柠条和油蒿两种典型固沙灌木不同组织的水势调节能力研究发现,膨压消失前后敏感系数随木质化程度降低,表明低木质化程度的幼嫩组织对水分亏缺更敏感。此外,幼嫩组织的膨压调节能力强于渗透调节能力,在水势降低时,由于其较高细胞壁弹性和较弱储水能力而更易失水,即幼嫩组织由于其较弱的水势调节能力而对于干旱更为敏感<sup>[100]</sup>。木质部水力结构是影响植物体内长距离水分运输的主要内在因素,决定了各器官间的水分传输效率<sup>[101-102]</sup>。对不同水分条件下不同年龄柠条水力功能性状研究发现,干旱区柠条生长主要受土壤水分限制,而非灌木年龄<sup>[103]</sup>。此外,在干旱环境下,柠条木质部导管密度增大、导管直径变窄,从而在保证水力传导效率的同时,提高了水力安全性。木质部水力结构变异通过介导木质部水力传导也调控叶片光合碳同化和生长,即限制柠条生长并维持其存活的主要水力机制是木质部水力安全性和水力效率的协同变异<sup>[103]</sup>。总之,荒漠灌木在长期干旱生境中进化出独特的水力传导系统网络,在维持生存的同时保障适度生长。

### 2.4 土壤水分承载力和植被演替

土壤水分是陆地水循环的关键环节,亦是联系陆地水文过程与生态过程的纽带。在干旱沙区,土壤水分是植物存活和生长的基础,也是人工植被建设和生态恢复的关键限制因子,其植被承载力决定了植被群落的组成、密度、结构及其空间分布格局,驱动固沙植被-土壤系统的演替<sup>[4]</sup>。有限的土壤水分可承载的植被最大荷载定义为土壤水分的植被承载力。沙坡头地区年均降水仅为186 mm,且地下水埋深超过60 m,植物难以利用地下水。在此情况下,沙丘土壤含水量维持在2%~5%时,能够支撑相对稳定的植被数量,这一特征可以表述该地区土壤水分的植被承载能力<sup>[104]</sup>。当植被-土壤水分达到新的平衡状态时,在给定降水条件下形成的植被稳定性特征与土壤水分平衡是确定植被承载力的重要依据。

人工植被建立后随固沙年限增长,固沙植被对



水分利用使得土壤含水量逐步下降,同时生物土壤结皮拓植和表层土壤发育演替(如黏粒和粉粒含量增加)使得表土层持水能力增加,导致降水对深层土壤水分补给减少,即土壤水分有效性表现出浅层化<sup>[48,105]</sup>。一方面导致一些耗水量较大的深根系植物种受水分胁迫而逐步退出生态系统,耐旱性强的植物保持低盖度和自我更新;另一方面增加了浅根系草本植物萌发、定居和繁衍机率,使群落中大量草本植物得到发展<sup>[4]</sup>,最终形成较为稳定的灌木-草本-隐花植物斑块状分布格局<sup>[3]</sup>。沙坡头人工固沙植被系统建立9~10年后,土壤含水量从植被建立前的3%~3.5%降至1.5%,灌木生长开始受到抑制,耗水较大的灌木如沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等逐步退出生态系统,40年后土壤含水量稳定在1.2%左右,耐旱性强的灌木如柠条、花棒(*Hedysarum scoparium*)和油蒿维持较低的盖度(<10%),与此相对应的草本和生物土壤结皮盖度增加并维持在35%和60%左右<sup>[3,106]</sup>。基于生态水文阈值模型的模拟结果,在年均降水量为186 mm的腾格里沙漠沙坡头地区,灌木和生物土壤结皮盖度分别维持在10%和60%,深层土壤水分维持在3%左右,反映了该地区土壤水分最大植被承载力<sup>[106]</sup>。因此,在植被重建与生态修复实践中,应遵循灌木盖度和生物土壤结皮盖度不宜超出生态水文阈值的原则,以确保固沙植被的长期稳定性及固沙效益的持续发挥<sup>[107-108]</sup>。

### 3 展望

#### 3.1 多尺度生态水文过程综合研究

固沙植被系统生态水文研究亟需突破传统点尺度局限,构建从叶片、个体、群落到生态系统的多尺度观测与模拟体系,以揭示SPAC系统水分传输与转化的跨尺度机制。在全球气候变化背景下,降水模式改变、气温升高及极端气候事件频发将进一步影响干旱区水循环过程。基于沙坡头站建立的中国北方沙区水量平衡自动模拟监测系统(沙坡头蒸渗仪群),结合长期定位观测、遥感技术和无人机监测、同位素示踪技术以及生态水文模型等,解析干旱区人工植被蒸散发组分的时空分配规律,构建“水量阈值-植被耗水-系统稳定”的动态耦合生态水文模型,以预测气候变化对干旱区水循环和生态系统反馈关系。

#### 3.2 固沙植被对水分变化的响应

水分是干旱生态系统组成、结构、功能的最重要驱动力和关键非生物限制因子。气候变化一定程度上改变干旱区降水格局(包括降水量、频率及时空分布),进而深刻影响植被群落的结构动态、功能特征和系统稳定性。为揭示固沙植被系统对水分变化的响应及稳定性维持机制,亟需重点关注以下关键问题:①植物种间水分竞争与水文生态位分化;②根系构型与水分获取策略的协同演化;③植被碳-水耦合过程及其环境调控;④水分介导的灌木-草本-生物土壤结皮相互作用关系。

#### 3.3 以水定绿固沙植被配置生态水文关键阈值

土壤水分植被承载力是“以水定绿”科学治沙的关键,明确植被密度与水资源承载力的临界阈值是关键。固沙植被的生态效益(如防风固沙)与水文风险(如水量失衡)存在权衡关系,亟需量化生态系统可持续维持的临界阈值。未来需着力于水分承载力动态评估,即建立基于水量平衡的植被密度调控模型,考虑降水波动、地下水补给与植被需水的动态匹配,优化以水定绿植被配置。通过长期生态水文定位观测与可控试验验证,提出融合生态稳定性与水资源承载力的植被调控范式,为干旱区生态修复重建提供可借鉴的解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 曾国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J].林业资源管理,2023(1):1-7.
- [2] Zheng X, Zhu J J, Wang G G, et al. Assessing the ecological effects of the world's largest forestry eco-engineering: Three-North Protective Forest Program within the initially scheduled range from 1978 to 2022 [J]. Science China Life Sciences, 2024, 68: 314-327.
- [3] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(增刊1):397-410.
- [4] 李新荣,张志山,谭会娟,等.我国北方风沙危害区生态重建与恢复:腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):257-266.
- [5] 王新平,张志山,张景光,等.荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J].中国沙漠,2005,25(2):196-201.
- [6] 肖洪浪,李新荣.沙坡头站雨养人工生物防护体系水平衡研究五十年[J].中国沙漠,2005,25(2):166-172.
- [7] 刘焯心.主要沙生植物的蒸腾强度[M].北京:科学出版社,1963.
- [8] 李鸣冈,陈隆亨,陈文瑞.腾格里沙漠包兰铁路沿线中卫段固

- 沙造林研究中的水分问题[J]. 科学通报, 1958, 9(8): 249–251.
- [9] 陈文瑞, 陈秀贞. 沙坡头格状沙丘水分状况的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [10] 陈文瑞, 张继贤. 流动沙丘的水分状况与固沙造林[M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [11] 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧29年人工植被区的水量平衡[M]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1991.
- [12] 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1980.
- [13] 冯金朝, 刘立超, 肖洪浪, 等. 沙坡头地区土壤水分吸湿凝结的动态观测与理论计算[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 12–17.
- [14] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 田间测定沙地水分运动参数初步研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 19–23.
- [15] 刘树华, 黄子琛, 刘立超. 土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模拟[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995.
- [16] 姚德良, 李家春, 沈卫明. 植物固沙区土壤水热运移耦合模型研究[J]. 力学学报, 1996, 28(5): 2–10.
- [17] 杨诗秀, 雷志栋, 刘元波. 裸沙地降水入渗水分动态分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995.
- [18] 王新平, 张利平, 刘立超, 等. 干旱沙区陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 61–64.
- [19] 张志山, 李新荣, 赵洋, 等. 沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1119–1135.
- [20] Levia D F, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems [J]. Journal of Hydrology, 2003, 274(1/4): 1–29.
- [21] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合, 响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 41(12): 1721–1730.
- [22] Wang X P, Zhang Y F, Wang Z N, et al. Influence of shrub canopy morphology and rainfall characteristics on stemflow within a revegetated sand dune in the Tengger Desert, NW China [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(10): 1501–1509.
- [23] Yue K, Frenne P D, Fornara D A, et al. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs [J]. Global Change Biology, 2021, 27(14): 3350–3357.
- [24] Zhang Y F, Yuan C, Chen N, et al. Rainfall partitioning by vegetation in China: a quantitative synthesis [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128946.
- [25] Zhang Z S, Zhao Y, Li X R, et al. Gross rainfall amount and maximum rainfall intensity in 60-minute influence on interception loss of shrubs: a 10-year observation in the Tengger Desert [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26030.
- [26] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1084–1095.
- [27] Li L, Li X Y, Zhang S Y, et al. Stemflow and its controlling factors in the subshrub *Artemisia ordosica* during two contrasting growth stages in the Mu Us Sandy Land of northern China [J]. Hydrology Research, 2016, 47(2): 409–418.
- [28] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Stemflow in two xerophytic shrubs and its significance to soil water and nutrient enrichment [J]. Ecological Research, 2013, 28(4): 567–579.
- [29] Dunkerley D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 669–678.
- [30] Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389: 363–372.
- [31] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity [J]. Advances in Water Resources, 2006, 26: 974–986.
- [32] Wang X P, Zhang Y F, Hu R, et al. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454: 152–159.
- [33] Wang X P, Zhang H, Zhang Y F, et al. Dependence of shrub canopy water storage on raindrop size in revegetated desert [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2015, 60(4): 760–769.
- [34] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Meteorological influences on process-based spatial-temporal pattern of throughfall of a xerophytic shrub in arid lands of Northern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619–620: 1003–1013.
- [35] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 406–416.
- [36] Zhao Y, Zhang Z S, Tan H J, et al. Rain shadow effects of individual shrub related to crown shape in arid desert [J]. Ecohydrology, 2019, 12(3): e2076.
- [37] 王倩, 袁川, 张亚峰, 等. 基于文献计量分析的穿透雨空间异质性及其时间稳定性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 315–328.
- [38] Li X Y, Hu X, Zhang Z H, et al. Shrub hydroponology: preferential water availability to deep soil layer [J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4): 1–8.
- [39] Guo L, Mount G J, Hudson S, et al. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface critical zone: visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots [J]. Geoderma, 2020, 357: 113953.
- [40] Johnson M S, Lehmann J. Double-funneling of trees: stemflow and root-induced preferential flow [J]. Ecoscience, 2006, 13(3): 324–333.
- [41] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, et al. Connecting ecohydrology and

- hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133–1144.
- [42] Wang X P, Wang Z N, Berndtsson R, et al. Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 561–567.
- [43] Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, et al. Variations of nutrients in gross rainfall, stemflow, and throughfall within revegetated desert ecosystems[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2016, 227(6): 1–17.
- [44] Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, et al. Global quantitative synthesis of effects of biotic and abiotic factors on stemflow production in woody ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(8): 1713–1723.
- [45] Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, et al. Intrastorm stemflow variability of a xerophytic shrub within a water-limited arid desert ecosystem of Northern China[J]. *Science in Cold and Arid Regions*, 2017(9): 495–502.
- [46] Chen N, Zhang Y F, Zhao C M. On the importance of stemflow to the woody plants in drylands: individual vs. ecosystem scales[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126591.
- [47] 王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 草原化荒漠带人工固沙植被区土壤水分动态[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 216–222.
- [48] Wang X P, Young M H, Yu Z, et al. Long-term effects of restoration on soil hydraulic properties in revegetation-stabilized desert ecosystems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L24S22.
- [49] Li X R, He M Z, Zerbe S, et al. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(8): 932–940.
- [50] Shi W, Wang X P, Zhang Y F, et al. The effect of biological soil crusts on soil moisture dynamics under different rainfall conditions in the Tengger Desert, China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(10): 1363–1374.
- [51] 王新平, 李新荣, 潘颜霞, 等. 我国温带荒漠生物土壤结皮孔隙结构分布特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 58–62.
- [52] Wang X P, Berndtsson R, Li X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2004, 49(2): 283–295.
- [53] Wang X P, Brown-Mitic C M, Kang E S, et al. Evapotranspiration of *Caragana korshinskii* communities in a revegetated desert area: Tengger Desert, China[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(17): 3293–3303.
- [54] Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(3): 147–154.
- [55] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(1): 1–16.
- [56] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, Northern China[J]. *Restoration Ecology*, 2004, 12(3): 376–390.
- [57] Li X R, Jia R L, Chen Y W, et al. Association of ant nests with successional stages of biological soil crusts in the Tengger Desert, Northern China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 59–66.
- [58] 王正宁, 王新平. 荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1108–1113.
- [59] Pan Y X, Wang X P, Jia R L, et al. Spatial variability of surface soil moisture content in a re-vegetated desert area in Shapotou, Northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(9): 1675–1683.
- [60] Pan Y X, Wang X P. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, Northern China[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(11): 1591–1601.
- [61] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 81–86.
- [62] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F, et al. Spatio-temporal variability of root zone soil moisture in artificially revegetated and natural ecosystems at an arid desert area, NW China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 79: 100–112.
- [63] Wang X P, Berndtsson R, Pan Y X, et al. Spatiotemporal variation of soil water potential and its significance to water balance for a desert shrub area[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 224: 105506.
- [64] Zhang Z S, Xu B X, Zhao Y, et al. Long-term water balance variation after revegetation on the southeastern edge of the Tengger Desert[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108216.
- [65] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. *水利学报*, 1998(10): 37–40.
- [66] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 等. 沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 56–60.
- [67] Liu L C, Song Y X, Gao Y H, et al. Effects of microbiotic crusts on evaporation from the revegetated area in a Chinese desert[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(6): 422–427.
- [68] 张志山, 李新荣, 王新平, 等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾[J]. *生态学报*, 2005(10): 2484–2490.
- [69] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性: 以沙坡头沙漠研究试验站为例[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 404–410.
- [70] 张志山, 谭会娟, 周海燕, 等. 用气孔计测定沙漠人工植物的蒸腾[J]. *草业学报*, 2006, 15(4): 129–135.
- [71] 陈荷生. 沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及其环境意义[J]. *干旱区研究*, 1992, 9(1): 31–38.
- [72] Zhang J, Guan K, Peng B, et al. Assessing different plant-centric water stress metrics for irrigation efficacy using soil-plant-atmosphere-continuum simulation[J]. *Water Resources Re-*



- search, 2021, 57(9): e2021WR030211.
- [73] Jin Y X, Wang X P, Zhang Y F, et al. Evapotranspiration of xerophytic shrub *Salsola passerina* and *Reaumuria soongorica* in an arid desert ecosystem of NW China [J]. *Hydrology Research*, 2018, 49(6): 1847–1863.
- [74] 张志山, 韩高玲, 霍建强, 等. 固沙灌木柠条锦鸡儿和中间锦鸡儿木质部导水与叶片光合能力对土壤水分的响应[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(10): 1422–1431.
- [75] Huang L, Zhang Z S, Li X R. The extrapolation of the leaf area-based transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area in the Tengger Desert, China [J]. *Hydrology Research*, 2015, 46(3): 389–399.
- [76] 金艳霞, 王新平, 张亚峰, 等. 红砂(*Reaumuria soongorica*)、珍珠(*Salsola passerina*)蒸腾耗水规律的尺度整合[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 286–293.
- [77] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(9): 1073–1082.
- [78] Filella I, Peñuelas J. Partitioning of water and nitrogen in co-occurring Mediterranean woody shrub species of different evolutionary history [J]. *Oecologia*, 2003, 137(1): 51–61.
- [79] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water [J]. *Nature*, 1991, 350(6316): 335–337.
- [80] Huang L, Zhang Z S. Stable isotopic analysis on water utilization of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China [J]. *Water*, 2015, 7(3): 1030–1045.
- [81] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2002, 33(33): 507–559.
- [82] Zhang Z S, Li X R, Liu L C, et al. Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, Northwestern China [J]. *Journal of Plant Research*, 2009, 122(1): 109–119.
- [83] Zhang Z S, Li X R, Wang T, et al. Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Kracsh. in the Tengger Desert (North China) [J]. *Arid Land Research and Management*, 2008, 22(3): 195–211.
- [84] Huo J Q, Shi Y F, Chen J J, et al. Hydraulic trade-off and coordination strategies mediated by leaf functional traits of desert shrubs [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 938758.
- [85] Bao J T, Wang J, Li X R, et al. Age-related changes in photosynthesis and water relations of revegetated *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, Northern China [J]. *Trees—Structure and Function*, 2015, 29(6): 1749–1760.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F. Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(3/4): 265–272.
- [89] 陈荷生, 康跃虎. 沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义[J]. *干旱区资源与环境*, 1992, 6(2): 63–72.
- [90] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 331–337.
- [91] Jia R L, Li X R, Liu L C, et al. Effects of sand burial on dew deposition on moss soil crust in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 2341–2349.
- [92] Wang X P, Pan Y X, Hu R, et al. Condensation of water vapour on moss-dominated biological soil crust, NW China [J]. *Journal of Earth System Science*, 2014, 123(2): 297–305.
- [93] Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F, et al. Dew formation characteristics at annual and daily scale in xerophyte shrub plantations at Southeast margin of Tengger Desert, Northern China [J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(5): e1968.
- [94] 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.
- [95] Pan Y X, Wang X P, Ma X Z, et al. The stable isotopic composition variation characteristics of desert plants and water sources in an artificial revegetation ecosystem in Northwest China [J]. *Catena*, 2020, 189: 104499.
- [96] Rao B, Liu Y, Wang W, et al. Influence of dew on biomass and photosystem II activity of cyanobacterial crusts in the Hopq Desert, Northwest China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(12): 2387–2393.
- [97] Quijano J C, Kumar P, Drewry D T, et al. Competitive and mutualistic dependencies in multispecies vegetation dynamics enabled by hydraulic redistribution [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): W05518.
- [98] Zhang H X, McDowell N G, Li X R, et al. Hydraulic safety and growth rather than climate of origin influence survival in desert shrubs and trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 543: 121130.
- [99] Tyree M T, Hammel H T. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1972, 23(1): 267–282.
- [100] Huo J Q, Shi Y F, Zhang H X, et al. More sensitive to drought of young tissues with weak water potential adjustment capacity in two desert shrubs [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148103.
- [101] 龚容, 徐霞, 田晓宇, 等. 三种锦鸡儿属植物水力结构特征及其干旱适应策略[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 4984–4993.
- [102] Hacke U G, Spicer R, Schreiber S G, et al. An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, 40(6): 831–845.

- [103] Huo J Q, Li C Y, Zhao Y, et al. Hydraulic mechanism of limiting growth and maintaining survival of desert shrubs in arid habitats[J]. *Plant Physiology*, 2024, 196(4): 2450–2462.
- [104] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. *Science China-Life Sciences*, 2014, 57(5): 539–548.
- [105] Li X R, Hui R, Tan H J, et al. Biocrust research in China: recent progress and application in land degradation control[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 751521.
- [106] 张定海, 李新荣, 陈永乐. 腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3273–3279.
- [107] Li X R, Zhang D H, Zhang F, et al. The eco-hydrological threshold for evaluating the stability of sand-binding vegetation in different climatic zones[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 404–415.
- [108] 张定海, 李新荣, 张鹏. 生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(4): 678–688.

## Progress in ecohydrological studies of artificial sand-fixing vegetation systems

Zhang Yafeng, Pan Yanxia, Huo Jianqiang, Zhang Zhishan

(State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands / Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Vegetation-based sand fixation is a crucial approach for desertification control and ecological restoration in arid sandy regions of China. The establishment and succession of artificial sand-fixing vegetation profoundly reshape the water cycle processes and water balance patterns within the vegetation-soil system, while hydrological processes, in turn, regulate the structure, function, and ecological stability of plant communities. This paper systematically reviews the key advances in ecohydrological research on sand-fixing vegetation systems, focusing on: (1) the evolution of key hydrological processes and water balance in vegetation-soil systems, particularly canopy hydrological processes, soil water dynamics, and evapotranspiration; and (2) plant growth, vegetation structure, and functional responses driven by hydrological processes, with emphasis on plant water use and regulation, hydraulic adjustment mechanisms, ecohydrological effects of condensation water, and soil water carrying capacity for vegetation. Future research should prioritize multi-scale monitoring, coupled process modeling, and identification of critical ecohydrological thresholds to provide theoretical support for the “greening based on water” strategy in combating desertification.

**Key words:** arid sandy regions; sand-fixing vegetation; ecohydrology; water balance; plant-water relations