

# 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

李新荣<sup>①②\*</sup>, 张志山<sup>①②</sup>, 黄磊<sup>①②</sup>, 王新平<sup>①②</sup>

① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000;

② 甘肃省寒区旱区逆境生理与生态重点实验室, 兰州 730000

\* 联系人, E-mail: lxinrong@lzb.ac.cn

2012-06-06 收稿, 2012-12-11 接受

国家杰出青年科学基金(40825001)和国家重点基础研究发展计划(2013CB429906)资助

**摘要** 土壤水分是沙区主要的生态限制因子, 沙区植被组成、格局和过程取决于水文过程, 植被的演替又改变着水文过程. 本文评述了干旱沙区人工固沙植被生态-水文过程研究所取得的进展, 并以腾格里沙漠东南缘沙坡头地区人工固沙植被的演变为例, 分析了 50 余年来我国在该领域的主要研究成果, 进而结合沙区植被建设存在的主要科学问题, 提出了未来研究的重点.

## 关键词

固沙植被格局与过程  
水分平衡  
沙区水文过程  
生物土壤结皮  
人工植被稳定性

我国的风沙危害区主要分布在东经 75°~125°和北纬 35°~50°, 横跨极端干旱、干旱、半干旱和半湿润区等不同生物气候带. 其中年降水大于 250 mm 的东部沙地和农牧交错带, 以及贺兰山以西年降水小于 200 mm 的沙漠与绿洲、沙漠与荒漠草原过渡区是我国沙漠化和风沙危害最为严重的地区<sup>[1]</sup>, 也是进行无灌溉植被建设和构建国家北方生态屏障的关键区<sup>[2]</sup>.

为了有效遏制风沙危害, 防止沙化土地进一步扩张, 国家先后在风沙危害区启动了“三北”防护林建设、退耕还林和京津风沙源治理等以人工植被建设作为主要生态修复措施的一批重大生态建设工程<sup>[3]</sup>. 50 余年来, 我国沙区植被建设取得了举世瞩目的成就, 有效遏制了沙漠化的发展, 促进了局地生境恢复, 但也在实践中出现了许多问题, 无论是在降水较大的东部沙区还是降水较小的贺兰山以西沙区, 不同程度地存在局地地下水下降, 固沙植被衰退和死亡的现象, 直接影响了沙区的生态恢复和防风固沙效益的可持续性.

土壤水分是沙区植被系统格局和过程的驱动力<sup>[4,5]</sup>, 水文过程控制植物的生长、植被演替和景观分异等主要过程. 人工植被是土地荒漠化和水土流失的主要调控者, 生态-水文过程及其互馈机理是干旱区生态恢复重建中必须面对的基础科学问题<sup>[6,7]</sup>. 早在 20 世纪 50 年代, 我国学者在包兰铁路沿线流动沙丘地区建立固沙植被防护体系时, 就开始了对人工植被系统的水循环与水分平衡的研究<sup>[8]</sup>, 取得了系列研究成果<sup>[9,10]</sup>, 这些长期定位研究对深入了解沙区植被-土壤系统的生态-水文过程、互馈作用机理和植被的稳定性维持, 以及未来人工固沙植被的建设具有重要的借鉴意义. 基于中国科学院沙坡头沙漠研究试验站在腾格里沙漠东南缘沙坡头地区 50 余年的长期定位研究, 分析和综述了我国沙区人工植被系统生态-水文过程及其互馈机理研究方面所取得的主要进展, 并提出了未来研究的重点, 旨在促进干旱区生态学与水文学交叉研究, 服务于沙区生态建设和减缓风沙危害的实践需求.

**引用格式:** 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. 科学通报, 2013, 58: 397-410

**英文版见:** Li X R, Zhang Z S, Huang L, et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China. Chinese Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5662-5

## 1 沙区植被-土壤系统水文过程的研究

### 1.1 固沙植物冠层对降水的截留与再分配

降水是沙地生态系统最重要的水分输入,对维持植被的稳定持续发展具有重要的作用,决定着土壤、植被和大气界面间(SVAT)的主要物质传输过程<sup>[9,10]</sup>。冠层截留直接影响着植被-土壤系统的水文过程,是决定系统水量平衡的关键过程之一。长期监测发现沙区不同类型和结构的植物群落冠层对降水的截留能力为0.7~1.1 mm,群落冠层累计截留量与次降水量和降水强度之间的关系符合指数方程变化特征,当降水强度增大至40 mm d<sup>-1</sup>时,截留量接近于常数,截留率的阈值为0.2~0.3<sup>[11,12]</sup>。但对于不同的固沙灌木而言,截留量也受到其地上部分的分形结构、冠层体积和叶面积指数的显著影响,距离灌木主干越近截留损失越大。柠条(*Caragana korshinskii*)截留量与降水量的比值和冠层体积与叶面积指数呈现显著正相关,而对油蒿(*Artemisia ordosica*)则不显著。前者的最小、最适、最大冠层储水量及自由穿透系数分别为0.46, 0.68, 4.94和0.47 mm,而后的上述参数分别为0.38, 0.52, 1.01和0.62 mm。在单株水平上油蒿和柠条的冠层截留损失分别占到降水量的15%和27%,占单位面积的6%和11%<sup>[12,13]</sup>。与奇瓦瓦沙漠(Chihuahuan Desert)和内盖夫沙漠(Negev Desert)灌木降雨截留的研究相比<sup>[14~18]</sup>,沙坡头地区固沙区灌木的截留损失低于这些地区(截留损失占降水量的10%~60%),这主要归因于所选固沙灌木稀疏的冠层结构及较低的叶面积指数。因此从对降水截留的角度来看,固沙植物种选择中应选择茎秆和枝条相对稀疏的种<sup>[12,13]</sup>。

另外,植物冠层截留的部分降水和一些养分物质还可以通过树干径流直接输送至植物根部。固沙灌木能够通过树干径流收集5%~10%的降水,而根际区的根道系统有利于树干径流的下渗,缓解根际区土壤水分亏缺<sup>[19]</sup>。柠条产生的树干径流分别占年降水量和降水次数的69%和34%,其产生树干径流的最小降水量为2.2 mm,单株水平径流量占降水量的比例为8%,汇流率(funnelling ratio)高达90%<sup>[20]</sup>。

### 1.2 生物土壤结皮对水文过程诸环节的影响机理

随着人工植被-土壤系统的演替,沙丘表面逐渐形成生物土壤结皮(biological soil crust, BSC),并从

蓝藻为优势的结皮向混生的藻类(绿藻和硅藻)结皮、地衣结皮和藓类结皮逐渐演变<sup>[10]</sup>。BSC的存在深刻影响着固沙区的水文过程,且受本身水文物理性质制约<sup>[12,21~23]</sup>。随着BSC的拓殖发展,结皮和其下的亚土层增厚、土壤容重下降和土壤持水能力增加,其持水能力依次是藓类结皮>地衣结皮>藻类结皮>蓝藻结皮<sup>[24]</sup>。固沙区BSC的形成和发育同地形有关,在迎风坡和丘间地占优势的藓类结皮的持水能力明显高于处于背风坡和丘顶的藻类结皮的持水能力<sup>[7,21~23,25~27]</sup>。此外,表土层导水率变化也与结皮类型有关,BSC存在时表土层饱和导水率和接近饱和状态时的非饱和导水率(土壤水势>-0.01 MPa)低于流沙的一个数量级,藓类结皮高于藻类结皮,而干旱条件下的非饱和导水率(土壤水势<-0.01 MPa)随固沙年代的延长趋于增加<sup>[28,29]</sup>。正是由于BSC特殊的水文物理特点决定了它们对荒漠地区土壤微生境的改善与促进作用,其较高持水能力与低土壤基质势条件下的较高非饱和导水率,能够提高浅层土壤水分的有效性,有利于人工固沙植被中一些浅根系灌木、草本植物与小型土壤动物的生存繁衍<sup>[20,30~32]</sup>。

通过对降水的截留作用,BSC显著地改变降水入渗过程和土壤水分的再分配格局,并在一定条件下可减少降水对深层土壤的有效补给<sup>[10,28,31]</sup>。入渗拦截大小依次为藓类结皮>地衣结皮>藻类结皮,三者在此<5 mm或者>10 mm的降水条件下没有显著的差异。土壤表层含水量和入渗深度密切相关,当次降水量大于5 mm时,结皮的存在显著地提高了表层土壤含水量,特别是藓类结皮,但是随着次降水量的增加,不同BSC类型覆盖下的土壤含水量之间的差异并不显著<sup>[7]</sup>。针对BSC在固沙区的地形分异,Li等人<sup>[33]</sup>采用LISEM(limburg soil erosion model)模型验证了藻类结皮覆盖的背风坡较藓类结皮覆盖的迎风坡更容易产流。在实验模拟的基础上,Li等人<sup>[33]</sup>、Li等人<sup>[25]</sup>和Wang等人<sup>[29]</sup>提出了BSC对降水入渗的影响取决于降水强度、区域的降水量和结皮层下土壤基质的理化性质及隐花植物组成差异的综合评价观点,从而解释了国际上来自不同研究区的长期争论。

不同类型的BSC对地表蒸发的影响不同,室内蒸发模拟观测表明,当待测土壤样品完全饱和后,有结皮的土样蒸发量均高于无结皮的土样,但在其蒸发过程中却表现出明显的阶段性差异,即在蒸发过程的初期(蒸发速率稳定阶段),BSC的存在增加了蒸

发, 当处于蒸发速率下降阶段时, 结皮的存在却抑制着蒸发<sup>[23,34,35]</sup>. 野外试验表明, 小降水事件后 BSC 表现出抑制蒸发的作用(藓类和藻类结皮分别当降水 <7.5 mm 和 <5 mm 时抑制蒸发), 较大的降水事件 (>10 mm) 则有利于土壤蒸发. 考虑到沙坡头地区 60% 的降水事件的降水量均 <5 mm, 可以认为固沙区 BSC 的形成抑制了土壤蒸发<sup>[36,37]</sup>. 总之, BSC 延长了水分在浅层土壤中的保存, 尤其是当出现干旱胁迫时, 结皮增加浅层土壤水分有效性的功能显得尤为重要, 保证有限水分的维持对分布在土壤浅层的高等植物的种子萌发和幼苗存活具有重要的意义<sup>[11,26,38-43]</sup>, 这也是驱使植被-土壤系统生物地球化学循环浅层化的重要原因之一<sup>[27]</sup>.

BSC 影响沙区水文过程的另外一个重要因素, 即对凝结水的捕获得到了不同区域研究者的肯定<sup>[36,44,45]</sup>. 凝结水为 BSC 中的隐花植物(蓝藻、绿藻、地衣和苔藓)和其他微小的生物体提供了珍贵的水资源, 激活了生物体的活性, 开始短时间的光合作用, 以及固氮过程(如蓝藻和一些地衣种). BSC 表面凝结水形成量随着结皮的发育程度呈增加的趋势, BSC 黏附大量微生物有机组分, 使得藓类与藻类结皮表面凝结水量较之物理结皮大幅度增加, 日均值高达  $0.15 \text{ mm d}^{-1}$  左右, 最大值接近  $0.5 \text{ mm d}^{-1}$ . 长期监测发现, 吸湿凝结水生成天数占总观测天数的 74%, 流沙、物理结皮和 BSC 表层的吸湿凝结水生成总量分别占同期降水量的 15.9%, 22.9% 和 37.9%<sup>[45]</sup>. 结皮对干旱区, 特别是年降水量 <200 mm 的沙区生态与水文过程的重要影响在于促使了沙地土壤有效水分含量的浅层化, 这一影响深刻地改变了沙地原来的水量平衡<sup>[46]</sup>.

总之, 固沙植被建立后形成的 BSC, 通过其不同于流沙区水文物理特征, 深刻地改变了降水入渗、土壤蒸发及凝结水捕获等水文过程及沙地土壤-植被系统原有的水分平衡关系. 这种改变驱动了固沙植被在组成、结构和功能上的响应, 不但解释了人工固沙植被退化的原因, 也较好地揭示了我国沙区人工植被演变的基本规律, 即向特定生物气候带地带性植被的演替<sup>[10]</sup>.

### 1.3 不同尺度上的固沙植物蒸腾耗水特征及水量平衡关系

在单一种群固沙植被中, 油蒿叶片的蒸腾速率

和水分利用效率显著高于柠条, 但当两者混交种植时它们的蒸腾耗水低于单一种植时的蒸腾耗水, 混交群落中柠条的蒸腾速率约为单一柠条种群的 80%, 油蒿约为 60%<sup>[47,48]</sup>. 在干旱胁迫时, 油蒿叶片的蒸腾速率降低的幅度大于柠条, 其机理是以膨压调节为主的油蒿较柠条(渗透调节为主)有明显高的水势调节能力, 使油蒿的气孔调节能力也明显高于柠条<sup>[47-50]</sup>.

在单株水平, 由于柠条冠幅和叶面积指数均比油蒿大, 其液流速率较高. 在生长季节, 柠条的液流速率主要由太阳辐射和相对湿度决定, 而油蒿则主要由太阳辐射、土壤温度和土壤水分决定. 油蒿的蒸腾更容易受到土壤水热因子的影响, 可归因于油蒿的根系分布比柠条浅. 柠条和油蒿的液流速率与作物参考蒸散量也呈现显著的线性关系. 同时, 两种植物茎干液流速率的启动和高峰值的来临要比叶片蒸腾提前, 这与植物体的缓冲作用对土壤干旱的响应有关<sup>[51,52]</sup>. 王新平等人<sup>[53]</sup>对沙漠区人工柠条林地的土壤水分动态的研究表明, 柠条根系密集层土壤含水量在总体上处于下降的过程, 但表现出昼消夜长的趋势. 沙生植物的叶水势在凌晨最高, 白天呈下降趋势, 傍晚得到恢复<sup>[54,55]</sup>, 验证了植物吸水和土壤水分间的互动关系.

在群落水平上, 因固沙植物对水分利用及 BSC 的形成, 改变了原有沙丘稀疏自然植被-土壤系统的水分平衡格局<sup>[9,10]</sup>. 利用大型蒸渗仪的 10 余年监测表明, 固沙植被区生长季节蒸散占同期降水量的 90% 以上, 根层深 2.2 m 以下土壤水无降水的补给作用, 而裸沙蒸发量与深沙层补给量分别占降水量的 70.5% 与 12.6%. 在湿润年的生长季内, 油蒿与柠条的日平均蒸散速率接近, 分别为  $0.86$  和  $0.87 \text{ mm d}^{-1}$ , 在干旱年油蒿的日平均蒸散速率降低为  $0.68 \text{ mm d}^{-1}$ , 而柠条的日平均蒸散速率仍然高达  $0.80 \text{ mm d}^{-1}$ . 通过对油蒿、柠条灌丛月蒸散量的比较发现, 干旱年柠条在降水相对集中且丰沛的月份具有较高的蒸散量, 致使根层年内贮水量亏缺量较油蒿灌丛严重, 油蒿灌丛却在整个生长季保持低蒸散水平, 这表明由于植物种利用水分的机制不同, 其蒸散量随年降水变化差异明显. 而裸沙区蒸发量日均值与月最大值几乎是固沙植被区蒸散量的一半<sup>[56]</sup>. 当经历连续 30 多天无雨期时, 柠条灌丛区土壤体积含水率由 1.8% 降低至 0.5% 以下, 平均蒸散速率由前期的  $2.2 \text{ mm d}^{-1}$

降至  $0.6 \text{ mm d}^{-1}$ . 油蒿灌丛区土壤体积含水率在1%左右变化, 平均蒸散速率由  $1.8 \text{ mm d}^{-1}$  降为  $0.9 \text{ mm d}^{-1}$ , 仍高于柠条灌丛区达 50%. 无植被沙区土壤体积含水率保持在大于2%的水平, 平均蒸发速率由  $1.1 \text{ mm d}^{-1}$  减小至  $0.4 \text{ mm d}^{-1}$ , 约为灌丛区平均蒸散速率的 60%, 土壤深层渗漏量达  $113.4 \text{ mm}$ , 占降水量的 40.5%, 渗漏速率平均为  $0.63 \text{ mm d}^{-1}$ <sup>[54]</sup>. 这些观测结果在很大的程度上揭示了稀疏植被分布的高大沙丘具有蓄水的功能, 以及在低洼地出现小范围沙漠湿地景观的原因. 固沙植被的建立有效地利用这部分下渗的水资源, 将部分渗漏损失水量转换成一定的生物量, 减少土壤深层水分渗漏损失<sup>[9,10]</sup>. 但从另一方面来看, 植被的建立彻底地改变了原来沙丘系统的水循环, 使沙丘与其他系统如低洼湿地或草地的水分联系减弱. 不合理的大范围沙地植被建设甚至会导致已有相邻的湿地萎缩或草地的退化, 这是在沙坡头地区 50 余年沙地生态-水文过程研究中得出的一个重要结论.

固沙区水量平衡各要素, 即植物蒸腾、土壤蒸发、冠层截留、深层渗漏和土壤贮水量在丰水年、平水年和干旱年的观测表明, 随生长季降水量的减少, 植物冠层截留量、蒸腾量、蒸发量和蒸散量也相应地减少. 混交灌木植被的冠层截留量和蒸腾量均高于单一物种的, 而蒸发量和蒸散量这 2 个参数在样地间无显著差异. 即使在丰水年, 纯柠条和混林样地均出现土壤水分的过度消耗, 而油蒿在平水年和干旱年出现水分亏缺. 相对于裸沙区, 植物固沙区无任何渗漏产生. 随着年降水量的减少, 蒸腾量占蒸散量的比例依次减少, 而蒸发量占蒸散量的比例依次增大. 干旱胁迫不仅降低了样地内植物的蒸腾量和蒸散量, 而且增加了降水的蒸发损失, 使可供植物利用的水分大幅减少<sup>[46]</sup>. 在沙漠区建立固沙植被后, 植物的生长大量利用了土壤水, 致使无多余的水分向深层发生渗漏<sup>[57]</sup>, 使原有沙区的水量平衡被新的平衡所取代<sup>[10,11,26,27,58,59]</sup>. 这种水量平衡关系的改变直接影响到植被的组成、盖度和生物量, 进而驱动了植被的演替<sup>[9,10]</sup>. 这些发现对沙区植被建设和后续的生态系统管理提供了重要的参考.

#### 1.4 固沙区的土壤水分的时空格局

长期连续的固定样地监测表明, 在年降水

<200 mm 的荒漠化草原地区, 固沙植被对水分的利用使植被建立 9~10 年后的土壤含水量(0~3 m)开始迅速下降(从植被建立前的 3%~3.5%降至 1.5%), 40 年之后则稳定在较低的水平(1.2%); 土层多年平均的月水分储量维持在  $67.9 \text{ mm}$ , 仅为流沙  $136.6 \text{ mm}$  的一半. 植被建立初期, 无论是浅层(0~0.4 m)还是深层(0.4~3 m)土壤含水量的动态变化均与降水的时空分布显著相关, 但植被建立 10 年后浅层土壤持水能力增加 80%, 水分有效性增加, 并与降水的时间分布密切相关, 而随着深层土壤含水量降低(从 4%~5%降至 1%), 开始与降水的时间分布无显著相关性<sup>[10,59]</sup>. 60 cm 以下土层含水量呈现出夏季低冬季高的特点, 并与降水趋势相反, 表明生长季蒸散耗水经常高出同期降水的补给量<sup>[60]</sup>.

随着固沙区 BSC 及其亚土层的逐年增厚, 固沙区土壤水分的有效性明显浅层化<sup>[7]</sup>. 流动沙丘的持水能力很低, 降水容易入渗到较深的土层, 以致深层流沙能保持较高的水分含量, 2 m 以下土壤水分接近田间持水量. 固沙 16 年后的人工植被区, 在灌木根系集中分布的 1~3 m 深层, 因土壤水分为植物利用, 降水难以补给到该土层, 以致逐渐干旱化; 但因结皮尚不深厚, 0~1 m 土层仍有部分降水入渗补给. 固沙 34 年后, 干沙层已在 0.2 m 土层以下出现, 土壤水分含量已接近凋萎湿度. 固沙 42 年之后土层中有效水分甚微, 0.1 m 深度处相对较高的含水量实际上是流沙和结皮层之间质地不同的结果<sup>[61,62]</sup>. 固沙沙丘不同部位被不同类型的 BSC 所覆盖, 引起表层含水量高的空间异质性<sup>[63]</sup>. 土壤水分含量表现为丘间地>背风坡>迎风坡, 丘间地变异程度小于迎风坡和背风坡. 地形是决定背风坡表层和亚表层及迎风坡亚表层土壤水分空间分布的主要因素, 而迎风坡表层土壤水分变化受风力等环境因子的影响较大<sup>[64]</sup>. 当固沙植被中深根系的灌木减少时(盖度 <10%时), 深层土壤(1.5~3.0 m)水分开始出现稳定和恢复的趋势<sup>[7,46]</sup>.

#### 1.5 沙区水文过程、植被格局与降水的动态关系

针对干旱沙区复杂的下垫面, 我国学者初步研发和改进了沙区陆面过程和 SPAC 水分能量传输模型, 并就其参数化进行了相关研究<sup>[65-68]</sup>. 但干旱半干旱区特有的稀疏植被覆盖使 SVAT 过程十分复杂<sup>[69-71]</sup>. 与具有连续覆盖的森林和作物相比, 除了

其不连续的植被覆盖导致大气下垫面的复杂化外, 区域土壤、植被边界层行为明显且截然不同而使 SPAC 理论在干旱半干旱区的应用中需要更多、且不易获取的参数。此外, 降水的波动性和随机性同样会引发 SPAC 系统中水循环各个过程的大范围波动。由于受各种条件的限制, 我国学者针对沙区的水循环的研究多侧重于 SPAC 系统的单个过程研究, 如沙地土壤水分入渗的研究<sup>[72-74]</sup>。

Li 等人<sup>[10,59]</sup>确定了沙区降水入渗、水分再分配与地表覆被特征的关系, 建立了入渗速率与降水强度及降水量与累计入渗量之间关系模型。黄磊<sup>[75]</sup>以根系吸水的宏观模型为基础, 结合不同深度土壤含水量资料与柠条和油蒿根系分布规律, 模拟分析了柠条和油蒿的根系吸水速率及根系吸水与其影响因素之间的关系, 建立了柠条和油蒿根系吸水的数学模型。王新平等人<sup>[56,57]</sup>建立了不同植被覆被条件下的蒸散发与同期降水量的经验关系。

基于对不同尺度下植物蒸腾长期监测, 以叶面积指数和有效盖度做为纯量, 根据气孔计、热平衡法及蒸渗仪观测结果, 实现了从叶片到种群水平的观测尺度转换; 另外, 根据对单种群固沙林和混交林的观测, 建立了蒸腾速率的线性方程组, 从而尝试了从种群到群落水平的尺度转换。这些转换结果与利用水量平衡法观测到的蒸散发和微型蒸渗仪观测的土壤蒸发的对比说明了尺度转换的可行性<sup>[47,48,51,76]</sup>。

结合干旱沙区植被时空分布格局特点, 利用生态动力学模型对斑块状(tiger vegetation)或者带状(banded vegetation)植被的景观格局进行模拟已经成为理论生态学和实验生态学研究的热点问题<sup>[77,78]</sup>, 也是沙区植被建设的理论依据之一<sup>[79]</sup>。根据对沙坡头地区 1955~2009 年的降水资料进行小波分析(wavelet analysis)结果显示, 沙坡头地区的年降水量存在着显著的 10~12 年和 25~27 年的周期变化, 并且在固沙早期阶段, 人工植被的演替规律和降水的周期振荡具有一致性, 验证了降水在荒漠区植被演替中的重要作用<sup>[80]</sup>, 并以此为基础, 建立了植物-水分关系的生态动力学模型<sup>[75]</sup>。模拟发现当降水在一定范围内变动时, 植被将呈现出不同的格局分布特征。证实了在沙坡头地区现有的多年平均降水条件下( $P=0.25 \text{ mm d}^{-1}$ ), 植被类型应以斑块状分布为主, 而非建立之初的均一分布<sup>[75]</sup>。

## 2 沙区植被格局与过程的研究

### 2.1 固沙植被在种类组成、结构和功能群等特征上的变化和演替规律

我国利用植物固沙已有 50 多年的历史, 实践中积累了许多成功的经验和失败的教训<sup>[81]</sup>。固沙植物种类选择相对单一和密集种植, 且以乔木树种为主, 是沙区植被建设初期的主要特点, 即使降水为 300~450 mm 的东部沙地大面积造林也会引发了地下水位下降和固沙植被衰退<sup>[82]</sup>。然而, 在降水 100~200 mm 的干旱沙区, 合理的植物种选择和配置仍然使固沙植被能够维持功能和结构的稳定<sup>[11,25]</sup>。包兰铁路沙坡头段植物固沙防护体系 56 年的长期监测研究表明, 采取不同的种类配置和种植密度的固沙植被建立 15 年后, 盖度从初期的 10% 增加到 35%, 有效地固定了流沙, 随后灌木的盖度下降, 50 年后盖度降至 10%<sup>[79]</sup>, 但固沙植被群落达到了稳定状态, 反映植被具备了自我调节的功能, 其中优势灌木种如柠条和油蒿具备了自我更新能力<sup>[83]</sup>。特别是大量的一年生草本开始在固定沙面定居和繁衍<sup>[59]</sup>, 从固沙植被建立初期的盖度为 1%~2% 的 2 种草本, 增加到 50 年后盖度为 30%~40% 的 16 种草本, 其中一些多年生草本出现在固沙植被中。此外, 大量的隐花植物出现在固沙植被组成中, 其种类组成从植被建立仅 5 年后的 5 种蓝藻发展到 50 年后的 24 种蓝藻、5 种地衣和 10 余种藓类<sup>[22,26,27]</sup>。

从植被的结构来看, 原来相对单一的灌木层片结构演变为多层次的、复杂种群混合分布的群落<sup>[21]</sup>。从固沙植被的功能群组成来看, 除了保持较低盖度的原有人工灌木种外, 群落中增加了  $C_4$  植物和隐花植物的比例<sup>[63]</sup>。 $C_4$  植物的增加使群落中植物种对水分的利用多样化, 隐花植物成为固沙植被区土壤碳库的重要来源和输入者<sup>[84,85]</sup>, BSC 的碳固定为蓝藻和地衣的固氮创造了条件, 使之成为氮素贫乏的沙地系统输送了大量的氮, 为大量的草本植物繁衍提供了珍贵的养分<sup>[86]</sup>。从固沙的角度看, BSC 有效地固定了沙面, 遏制了植被区沙尘向大气的输送<sup>[59]</sup>。

### 2.2 沙区植被组成多样性和格局维持机制

了解沙区自然植被组成的多样性与格局的维持机制是进行人工固沙植被建设的重要依据<sup>[87]</sup>。灌木

是我国干旱沙区主要的优势植物生活型<sup>[88,89]</sup>。灌木种在群落中的存在有利于退化沙地系统的生态恢复<sup>[90]</sup>，这是因为相对于草本，灌木更能忍耐和适应风蚀、沙埋，以及干旱等非生物因素的胁迫和放牧干扰，并且对土壤养分要求相对较小<sup>[21]</sup>，而草本植物的繁衍主要受到过度放牧、沙埋和干旱气候条件的制约。正因如此，建立固沙植被之初，宜选择旱生灌木而不采用草本植物<sup>[91]</sup>。

沙区灌木种的丰富度格局特点既反映了干旱荒漠/沙区气候与环境因素的影响，也反映了诸如过度放牧等人类活动和生态过程等长期综合作用的结果<sup>[92]</sup>。对贺兰山以西的阿拉善荒漠/沙区植被中灌木种类多样性及其维持机制的研究表明，深层土壤(0.4-3 m)的含水量对灌木物种丰富度和多度格局起着决定性的作用<sup>[92]</sup>，此结果并不支持在半干旱区土壤质地特性决定木本植物多样性格局的观点<sup>[93]</sup>。浅层土壤(0-0.4 m)含水量对草本植物，特别是一年生及短命和类短命植物种的丰富度和多样性的影响显著高于对木本植物的影响<sup>[94]</sup>。

沙坡头地区固沙植被经过 50 余年的演替，逐渐由以人工种植的木本植物为优势的群落演变为以草本植物为优势的天然植物群落，植被的空间格局由人为的均匀分布变为斑块状分布，即趋向于腾格里沙漠南缘草原化荒漠植被格局特征的演替<sup>[27,64]</sup>。

构成 BSC 的隐花植物是荒漠生态系统和沙区植被的重要组成部分，沙区较低的维管束植物覆盖和固定后的沙丘表面为其提供了适宜的生境<sup>[59]</sup>，BSC 的发育也是荒漠/沙区植被区别于其他植被类型的重要特征。Li 等人<sup>[63]</sup>对于干旱区 BSC 中隐花植物多样性的维持机制进行了探讨，认为复杂的微地貌过程造成的小尺度水分资源分异是维持其多样性的关键因素，在局地尺度上土壤理化和生物学属性决定着它们的种类多样性和类群差异，尤其是土壤的质地显得十分重要；在区域尺度上降水梯度决定着其种类的分布和盖度，如降水大于 300 mm 的科尔沁和毛乌素沙区发育以藓类为优势的结皮，而在降水小于 200 mm 的稳定沙丘发育以地衣为优势的结皮，经常受扰动的沙区则发育以蓝藻为优势的结皮<sup>[63]</sup>。

由此可见沙区植被格局和过程的主要决定因素是土壤水分，土壤水分是最能综合反映沙地水文过程的水文要素，而其他水文要素如降水和地下水等只有在转化为土壤水时才能被植被所利用。因此，沙

区土壤水的数量和质量是沙区植被建设(规模和范式)至关重要的依据。

### 2.3 BSC 与固沙植被的时空格局

BSC 通过增加凝结水的捕获、改变土壤表层结构影响水分蒸发进而改变了土壤浅层的水分含量，这种改变驱动了固沙植被在组成、结构和功能上的响应，即植被组成中浅根系的草本增加(种的丰富度和多度及盖度和生物量的增加)，深根系的木本植物减少(盖度和生物量的降低)和 C<sub>4</sub> 植物增加<sup>[7]</sup>。

沙坡头地区固沙植被-土壤系统长期生态学研究表明<sup>[21,26,57,59,95]</sup>，BSC 的存在直接地影响了固沙植被的空间格局。结皮的存在，特别是完整的地衣和藓类结皮的覆盖减少了种子雨进入土壤的机会，即降低了结皮覆盖区土壤的种子库，由于沙区的风力吹蚀作用，成熟的种子往往聚集在灌丛冠幅之下或蚂蚁和土壤动物的洞穴周围<sup>[33]</sup>，这样结皮覆盖区参与萌发的种子数量就减少<sup>[38]</sup>。此外，即使在结皮表面的种子在降水事件后获得机会萌发，但往往在根系进入土壤之前因迅速的水分散失而死亡<sup>[26]</sup>。因此，结皮的存在对固沙植被最终呈斑块状空间分布具有重要的贡献，是人工固沙植被向同一生物气候带沙区天然植被格局特征，即维管束植物和结皮镶嵌分布特点演替的重要驱动因素之一。

### 2.4 植被恢复特征与理论模式

荒漠化草原地区风沙危害十分严重，沙埋或局部沙丘活化常使原生植被景观被以流沙为主的景观所替代<sup>[83,95]</sup>，建立人工植被是实现生态恢复的有效措施<sup>[96,97]</sup>。研究表明，荒漠化草原植被退化过程中土壤属性(理化和生物学属性)的异质性程度增加，当异质性达到一定的程度时，土壤生境很难通过自然过程实现恢复(如禁牧或围封后的自然恢复)，人工植被的建立使土壤属性的异质性由初期的增强到后期的减弱，植被也因之趋于动态的稳定状态，由此认为土壤生境的恢复是植被系统恢复的前提，且土壤属性异质性的减弱指示着系统趋于恢复过程，而异质性增强预示系统处于退化过程<sup>[80]</sup>。这一理论模式解释了我国沙区近 300×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup> 人工植被演变的机理，对于干旱区植被建设和已有人工植被的生态管理具有重要的理论价值<sup>[6,24]</sup>。

Li 等人<sup>[25]</sup>模拟预测了腾格里沙漠南缘地区植被-

土壤系统的土壤特性的恢复过程和恢复速率. 结果表明, 在流动沙丘环境建立固沙植被 50 年后, 大多数表土层特性(参数)能够恢复到天然植被(被沙丘覆盖之前的荒漠草原植被)表土特性的 60%, 其中黏粒含量、表土层含水量、表土与结皮的厚度和土壤容重恢复到天然植被这些土壤特性水平需要 70~245 年的时间, 而土壤质地中的沙粒和粉粒百分含量、CaCO<sub>3</sub>、有机碳和电导度等土壤特性仅能恢复到天然植被的 20%~40%; 在 50 年的恢复期内土壤特性的恢复速度在恢复初期(1~15 年)快于恢复后期(40~50 年). 恢复(达到模型曲线渐近线值(asymptote value)的 90%)最快的是碳氮比(18 年), 需要时间最长的是土壤容重(245 年)<sup>[24]</sup>. 针对土壤水分状况, 则需要至少 120 年才能恢复到天然植被的浅层土壤水分状况, 尽管沙埋后生境经植被建设促进了表层土壤的持水能力, 但 50 年内仅能恢复到天然植被土壤持水能力的 79%, 而对于一些土壤特性如沙粒和粉粒百分含量和有机碳含量等, 在 50 年以后的相当长的时间内即使发生最大可能的恢复, 也不能达到天然植被土壤特性的水平. 这一预测结果说明在干旱荒漠地区土壤特性的生态恢复是一个十分漫长的过程, 土壤生境一旦遭到破坏, 即使人为促进的修复也是十分困难的, 甚至一些特性的退化是不可逆的<sup>[6,24]</sup>.

### 3 人工固沙植被对水文过程的响应及调控

#### 3.1 植物对土壤水分变异的形态调整对策和调控阈值

个体形态调整是植物适应水分变化的主要手段. 例如, 古尔班通古特沙漠的多枝怪柳和梭梭表现出不同的水分利用策略, 根系功能型的不同决定了前者的生存依赖地下水, 后者生存直接依靠大气降水<sup>[98]</sup>, 但是当干旱发生时, 梭梭能够及时进行根系的形态学调整来利用地下水<sup>[99]</sup>. 固沙植物随时进行形态调整来适应季节性的干旱, 柠条主要通过落叶、休眠、新稍停止生长来度过干旱期, 而油蒿则通过植株的部分或全部死亡来面临干旱, 并以大量的种子贮存在土壤种子库, 作为群落的组成而存在, 一年生植物是植被恢复区的机会主义者, 与降水密切相关, 表现为只在雨季萌发并迅速完成生活史<sup>[14,27,100,101]</sup>.

植物根系的形态调整表现在垂直分布与季节动态两方面. 柠条较油蒿有 deeper 的根系分布, 在降水不

能补给深层的情况下可以利用土壤深层的水分度过干旱期, 而油蒿则将更大比例的根系分布在浅层土壤, 有利于高效利用有限降水<sup>[13,29,102]</sup>. 植物细根的季节动态明显受到土壤水分的影响, 沙地土壤含水量每年出现 2 次高值, 同样固沙植物的根系也有两次快速生长期, 但生长的高峰期滞后于土壤水分的高峰期约一个月, 土壤水分的最大消耗期对应于根系的最大的生长期. 如果土壤含水量低于 2.75% (油蒿) 和 2.60% (柠条) 左右时, 根系将在一个月后出现生长高峰, 然而高于该值时, 根系均不会出现高值. 说明这一含水量可能是细根生长采取不同生态策略的阈值, 如果含水量高于这一阈值, 植物无需庞大根系来维持其对水分需求而保证其地上生物量生产, 根冠比往往较小. 而当土壤含水量低于这一阈值时, 植物又因受水分胁迫需要较庞大的根系来维持足够水分的获得, 从而维持正常的生理活动. 这一研究揭示了沙地植物根系对水分变化的响应和所采取的生态适应对策<sup>[29,102]</sup>, 并解释了干旱沙区植物地下生物量大比例分配的生态学机制<sup>[6]</sup>.

#### 3.2 固沙植被优势种群生存对策

种群生活史对策是现代生态学中受到普遍关注的理论问题. 荒漠区严酷的生境造就了适应于该生境的植物<sup>[103]</sup>. 固沙区半灌木油蒿的格局和动态是长期适应土壤水分演变的结果. 对腾格里沙漠东南缘两个样地(1981 年和 1964 年固沙植被区)油蒿种群静态生命表的研究表明, 1981 年固沙区油蒿种群的存活曲线为 Deevey II 型, 即种群是增长型, 1964 年固沙区的油蒿种群变化则不一致, 依据存活数、死亡数和总数量建立的存活曲线指示种群分别是稳定型、增长型和衰退型<sup>[104,105]</sup>. 说明随固沙时间的增加, 种群的动态趋势是由快速增长向慢增长, 以及衰退方向演变, 最终在人工植被区中保持较小的种群. 其原因主要是因土壤水分状况的恶化导致其总生物量、生殖生物量、头状花序数、繁殖分配和头状花序分配呈减小的趋势<sup>[106]</sup>.

在固沙植被的演替中一年生植物有可能替代油蒿和柠条等灌木成为优势种<sup>[104,107]</sup>. 随着沙面固定时间的增加和生境的改善, 一些一年生植物可将更多的资源和能量用于繁殖, 增加其种群规模, 而在沙丘固定时间相对短的地区, 一年生植物将把更多的资源和能量用于营养生长, 以抵御不利的土壤水分环

境<sup>[108]</sup>. 例如, 小画眉草(*Eragrostis poaeoides*)是固沙区草本层片的优势种. 其适应沙区环境的主要策略为种子的休眠, 即在生长季也只能有一部分种子萌发, 其余有活力的种子则保存到下一个生长季或更久. 在不同的固沙年代, 个体大小、繁殖体大小与有性繁殖分配的大小均存在差异, 但其地上营养器官生物量、茎重、叶片数和叶重年代差异不显著<sup>[109]</sup>. 在短时间尺度上, 草本层片的变化动态与降水有较大的相关性. 在较大的降水事件后, 出现一年生植物突发性萌发, 但随着再次的干旱, 层片内的一年生植物种群开始减少, 其中小画眉草和虎尾草(*Chloris virgata*)种群急剧减少, 而狗尾草(*Setaria viridis*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和虫实(*Corispermum declinatum*)种群减少幅度不大. 在生长后期由于降水的增多, 层片内每种植物均能完成生活史<sup>[110]</sup>.

### 3.3 固沙植被-土壤系统演替过程

固沙植被建立后, 流沙的固定使地表有一个稳定的沉积环境, 每年 350~440 kg hm<sup>-2</sup> 枯枝落叶和 4866 kg hm<sup>-2</sup> 粉尘沉积进入 BSC 层中<sup>[62]</sup>, 20 年以上的固沙区内结皮层因沉积环境不同, 土层厚度变化为 3~15 cm, 使得单一的风沙沉积剖面成了结皮层-风成沙的二元土体构型. 人工固沙植被的建立使干旱砂质新成土(风沙土)朝向区域性的筒育正常干旱土演变, 而且在结皮层较深厚的背风坡已见碳酸钙的白色沉积<sup>[62]</sup>. 这种土壤剖面分化、结皮层形成和土体构型的改变导致的土壤水分保持能力和入渗、再分配过程的变化主导了植物对水环境变化的长期适应及演替<sup>[10,11,20,28,111]</sup>.

人工植被建立 8~10 年后, 以灌木为主的植被覆盖度增加到 15%~25% 以上, 在 40 年后天然定居的物种(草本为主)增至 14 种以上, 但灌木层覆盖度降低到 6%~9%, 草本覆盖度是灌木的 3~4 倍; 30 年后以草本为优势层片的天然植被覆盖度基本维持在 25%~30%<sup>[10,57,58]</sup>, 以灌木为主的人工固沙植被已经被以草本为主的天然植被所取代, 也为其他物种多样性的繁衍提供了适宜的生境. 对鸟类、昆虫和土壤动物及荒漠动物的生存产生了积极的影响. 调查发现, 固沙植被区建立 46 年后共有鸟类 28 种, 昆虫 50 种, 动物 23 种. 物种多样性的显著变化也在一定程度上印证了固沙植被从单一的人工灌木植被到以草本层和隐花植物结皮层为优势, 逐渐向草原化荒漠

植被演替的趋势, 使原有的相对单一的固沙植被系统演变成一个结构、组成和功能相对复杂的荒漠生态系统<sup>[79]</sup>.

### 3.4 固沙区植被格局与水文过程关系

大多数荒漠/沙地生态系统是由非生物因素调控和胁迫的系统, 特别是因受水分的限制, 地表不可能支撑大面积、相对均一而连续分布的高等植物群落的覆盖, 植物斑块间的水分运移、径流发生与水分再分配过程构建了斑块之间的能量流、物流的源-汇关系<sup>[6,63]</sup>. 在模拟实验条件下, 荒漠化草原地带 BSC 斑块产生的径流有 55% 被重新分配至灌丛斑块, 而其产生的 75% 的侵蚀产物、63% 的有机质、74% 的氮和 60% 左右的溶解养分被径流携带而重新分配至灌丛斑块. 野外观测条件下, 在较小强度降水事件中(降雨强度 2.8 mm h<sup>-1</sup>), BSC 斑块产生的 32.9% 的径流、37.1% 的侵蚀产物、30.3% 的有机质、48.3% 的氮和 30.0% 的溶解养分被重新分配至灌丛斑块; 而在较大强度降水事件中(降雨强度 5.7 mm h<sup>-1</sup>), BSC 斑块产生的资源分别有 18.9% 的径流、31.1% 的侵蚀产物、9.84% 的有机质、19.0% 的氮和 10.0% 的溶解养分被重新分配至灌丛斑块<sup>[112]</sup>.

BSC 在中小尺度上空间分布差异是长期适应水环境变异的结果. 小尺度上的地表特征变化如各种原因形成的地表微地貌, 尤其是荒漠灌木土堆(desert shrub soil mounds)将有效增加降尘对系统的输入, 增加了土壤表面物质的沉积. 在中尺度上固沙区迎风坡、背风坡、丘顶及丘底被不同类型的 BSC 所覆盖. 在实际观测中, 灌木土堆的 4 个方向和沙丘的不同部位 BSC 的种类、物种的多样性、盖度和生物量都存在显著差异<sup>[7]</sup>. 这就造成了在中小尺度范围内微气候条件的改变, 如局部的遮荫、湿度、温度和紫外线辐射强度等, 使得结皮群落的组成和结构, 甚至生态功能存在差异. 同样, 微地形通过资源的再分配, 如对养分 N, P, K 和水分的再分配引起土壤属性的小尺度异质性, 特别是降尘的输入增加了表土层土壤质地中粉粒和黏粒的百分比含量, 使土壤养分和含碳量以及持水能力的增加, 进而改变着土壤的理化和生物学属性, 较好地解释了微地形尺度上的植物分布格局<sup>[63]</sup>.

## 4 未来研究的趋势

我国沙区植被建设从初期主要考虑成活率、保存

率、生物量和盖度等指标转变为从组成、结构和功能等多层次上考虑植被的稳定性和可持续性,这一转变反映了对沙区植被-土壤系统生态-水文过程和作用机理逐渐系统的认识. 鉴于目前沙区植被建设存在的问题和研究的不足, 仍需对以下几个方面的研究进一步加强.

#### 4.1 尺度转换

尺度问题一直是干旱区生态-水文过程研究的关键和难点问题. 不同研究所侧重的尺度不同, 表达的内涵各异, 使得结果的可比性差. 如在个体水平, 个体形态调整是植物适应水分变化的主要手段, 而在群落水平, 水环境变化主导植物的更新和演替进而决定植被格局和动态<sup>[11]</sup>. 可见, 在一个尺度上起作用的因子不一定在其他尺度上有意义, 尺度转换往往会导致时空数据信息丢失. 一些新的研究技术如外推和缩微技术<sup>[113]</sup>、RS 和 GIS 技术、同位素示踪技术、树轮技术及不同尺度的联网研究等使尺度转换成为可能.

#### 4.2 BSC 的生态-水文效应

BSC 是沙区人工植被系统的重要组成成分, 它们在干旱区生态-水文过程中发挥着重要的作用<sup>[114]</sup>. 藻类和地衣占优势结皮的存在, 减少了地表的降水入渗而增加了产流量, 有利于维管束植被斑块的水分和营养物质的获取<sup>[115-117]</sup>, 然而 BSC 对水文过程的作用也受其覆盖下的土壤理化性质的影响, 尤其是土壤质地<sup>[118,119]</sup>. 目前的难点是如何区分 BSC 层和其下的土壤性质对入渗、径流等水文过程的贡献. 近年来的监测发现, 固沙植被建立 40 年后沙丘的迎风坡和丘间低地主要被藓类结皮所覆盖, 而背风坡和丘顶被藻类结皮覆盖<sup>[7]</sup>. BSC 的这种地形分异有可能加剧地形过程和水文过程, 进而影响到固沙区的植被格局和过程. 这可能归功于藻类分泌的多聚糖不利于水分的入渗从而容易产流<sup>[120,121]</sup>, 而藓类由于假根和原丝体的导水作用利于水分入渗<sup>[35,121]</sup>. 相信 BSC 的地形分异将改变固沙区的水文过程和生态过程, 那么, BSC 对水文过程的影响阈值有多大, 其深入研究对沙区人工植被建设具有重要的参考价值.

#### 4.3 水文控制下的植被格局的动态

沙区植被的斑块状格局, 即带状植被和点状植

被格局, 在极端干旱和放牧压力条件下仍表现得相当的稳定, 这种格局是干旱区水文和生态过程长期作用的结果. 近年来, 科学家一方面关注降水事件后植被斑块和裸露斑块(BSC 斑块)对入渗、径流、侵蚀、土壤水及植被生产力直接和间接的影响<sup>[122-124]</sup>; 另一方面, 沙区极端降水事件和极端干旱对植物格局的影响也是国内外关注的重点领域<sup>[125]</sup>, 然而这些研究主要针对于某一时间段植被格局而言, 关于水文驱动下的植被格局动态的长期生态学(long-term ecology)研究明显不足. 研究长期水文过程中, 尤其是“降水-植物水-土壤水-地下水”相互转化和传输的变化与固沙植物种群的更新、存活及消亡, 以及和一年生草本、隐花植物的种内、种间关系及竞争替代关系, 进而阐明影响植被格局及动态的生态水文机理是沙区植被建设与固沙植被稳定性维持的重要研究内容和方向之一.

#### 4.4 生态-水文模型的构建及模拟

生态过程与水文过程在物质和能量传输的各个环节发生着密切的交互作用. 建立生态-水文模型是量化植被稳定性的生态-水文阈值和预测未来发展趋势的必要手段与有效途径. 降水作为干旱区重要的水分补给源, 具有很强的时空异质性和随机性<sup>[126]</sup>. 这种随机性深刻影响着植被的格局和动态, 是生态系统演替的核心驱动力和不同植物功能类型共存的重要原因<sup>[127]</sup>. 长期以来, 对植物水分关系的研究主要集中在确定性的水分条件下, 植物功能类型组成和生态系统生产力对降水的适应<sup>[128]</sup>, 而干旱沙区独特的植物群落格局和水文过程使得人们更愿意从随机生态水文学的角度考虑植物对水分的响应及反馈机制. 目前已有一些研究通过对区域内的水文过程与植被互馈的认识建立动力学模型, 模拟分析植被的格局和动态<sup>[77,78,129,130]</sup>, 或者通过一些概念模型如“诱发-迁移-储备-脉动”概念模型解释干旱区水文控制的生态格局的形成机制<sup>[122-124]</sup>. 然而, 最能反映干旱区水文特征的随机降水属性却没能在前者体现, 而后者仅为概念模型. 因此, 需要根据沙区的实际状况, 建立随机水文模型, 定量描述受“脉冲”降水控制的水文过程, 进而耦合植物生长和斑块动态模型, 构建植被对水分变异响应的生态水文耦合模型, 模拟分析受水分驱动的固沙植被格局和动态, 揭示固沙植被群落稳定性维持和演替的

生态水文学机理。

#### 4.5 人工植被稳定性维持和生态系统管理对策

通过与天然植被的对比试验研究, 确定固沙植被水资源利用的适宜生态阈值; 探讨生态系统管理

(如通过种群调节、功能群优化配置和多样性恢复、植被-土壤系统恢复和稳定土壤环境等措施)对水量平衡的影响和可调控的阈值; 探讨植被-土壤系统水分最佳有效利用的理论范式, 进而提出人工固沙植被-土壤系统可持续的生态管理对策。

#### 参考文献

- 1 朱震达, 刘恕. 中国的荒漠化及其治理. 北京: 科学出版社, 1989. 27-42
- 2 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全-北方农牧交错区卷. 北京: 科学出版社, 2010. 1-7
- 3 Wang G, Innes J L, Lei J, et al. China's forestry reforms. *Science*, 2007, 318: 1556-1557
- 4 Noy-Meir I. Desert ecosystem structure and function, hot deserts and arid shrublands. In: Evenari M, Noy-Meir I, Goodall D W, eds. *Ecosystems of the World*. Amsterdam: Elsevier, 1985. 93-103
- 5 Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77: 364-374
- 6 李新荣, 张志山, 王新平, 等. 植被系统恢复的生态水文学研究进展. *中国沙漠*, 2009, 29: 845-852
- 7 Li X R, Tian F, Jia R L, et al. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy deserts? Implications for managing artificial vegetation. *Hydrol Proc*, 2010, 24: 3621-3630
- 8 李鸣冈. 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. *科学通报*, 1958, 8: 218-219
- 9 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 Arid Environ*, 2004, 57: 1-16
- 10 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. *Restor Ecol*, 2004, 12: 376-290
- 11 Wang X P, Li X R, Zhang J G, et al. Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes. *Hydrol Sci J*, 2005, 50: 897-910
- 12 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 Plant Res*, 2009, 122: 109-119
- 13 张志山, 张景光, 刘立超, 等. 沙漠人工植被降水截留特征研究. *冰川冻土*, 2005, 27: 761-766
- 14 Pressland A J. Soil moisture redistribution as affected by throughfall and stemflow in an arid zone shrub community. *Aust J Bot*, 1976, 24: 641-649
- 15 Tromble J M. Water interception by two arid land shrubs. *J Arid Environ*, 1988, 15: 65-70
- 16 Mauchamp A, Janeau J L. Water funnelling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan Desert shrub. *J Arid Environ*, 1993, 25: 299-306
- 17 Martinez-Meza E, Whitford W G. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots of three Chihuahuan Desert shrubs. *J Arid Environ*, 1996, 32: 271-287
- 18 Wright J P, Jones C G, Boeken B, et al. Predictability of ecosystem engineering effects on species richness across environmental variability and spatial scales. *J Ecol*, 2006, 94: 815-824
- 19 王正宁, 王新平. 荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征. *中国沙漠*, 2010, 30: 1108-1113
- 20 Wang X P, Wang Z N, Berndtsson R, et al. Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2011, 15: 561-567
- 21 Li X R, Zhang J G, Wang X P, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand fixing vegetation in arid desert region. *Acta Bot Sin*, 2000, 42: 965-970
- 22 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. *土壤学报*, 2007, 44: 404-410
- 23 Wang X P, Young M H, Yu Z, et al. Long-term effects of restoration in soil hydraulic properties in revegetation-stabilized desert ecosystems. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L24S22
- 24 Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, Northern China. *Geomorphology*, 2007, 88: 254-265
- 25 Li X R, Zhou H Y, Zhu Y G, et al. The effects of re-vegetation on cryptogam species diversity in Tengger Desert, Northern China. *Plant Soil*, 2003, 251: 237-245

- 26 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. *Hydrol Proc*, 2009, 23: 1591–1601
- 27 Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Evolutionary characteristics of the artificially revegetated shrub ecosystem in the Tengger Desert, Northern China. *Ecol Res*, 2006, 21: 415–424.
- 28 张志山, 李新荣, 张景光, 等. 用 Minirhizotrons 观测柠条根系生长动态. *植物生态学报*, 2006, 30: 457–464
- 29 Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert. *Hydrol Proc*, 2007, 21: 72–79
- 30 Li X R, Zhang Z S, Zhang J G, et al. Association between vegetation patterns and soil properties in the Southeastern Tengger Desert, China. *Arid Land Res Manag*, 2004, 18: 369–383
- 31 王新平, 李新荣, 肖洪浪, 等. 干旱半干旱地区人工固沙灌木生态系统演变特征. *生态学报*, 2005, 25: 1974–1980
- 32 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. *Appl Soil Ecol*, 2011, 47: 59–66
- 33 Li T, Xiao H L, Li X R. Modeling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dunes in arid desert. *Arid Land Res Manag*, 2001, 15: 41–48
- 34 何明珠, 李新荣, 张景光. 土壤生物结皮蒸散特征研究. *中国沙漠*, 2006, 26: 159–164
- 35 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. *Aust J Soil Res*, 2007, 45: 422–427
- 36 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 Hydrol*, 2006, 328: 331–337
- 37 Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China. *J Arid Environ*, 2008, 72: 964–973
- 38 Li X R, Jia X H, Long L Q, et al. Effects of biological soil crusts on seed bank, germination and establishment of two annual plant species in the Tengger Desert (N China). *Plant Soil*, 2005, 277: 375–385
- 39 Su Y G, Li X R, Cheng Y W, et al. Effects of biological soil crusts on emergence of desert vascular plants in North China. *Plant Ecol*, 2007, 191: 11–19
- 40 龙利群, 李新荣. 微生物结皮对两种一年生植物种子萌发和出苗的影响. *中国沙漠*, 2002, 22: 581–586
- 41 龙利群, 李新荣. 土壤微生物结皮对两种一年生植物幼苗存活和生长的影响. *中国沙漠*, 2003, 23: 656–660
- 42 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 等. 生物土壤结皮对荒漠土壤种子库和种子萌发的影响. *生态学报*, 2007, 27: 938–946
- 43 苏延桂, 李新荣, 黄刚, 等. 实验室条件下两种生物土壤结皮对荒漠植物种子萌发的影响. *生态学报*, 2007, 27: 1845–1851
- 44 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. *中国沙漠*, 2001, 20: 4–11
- 45 Pan Y X, Wang X P, Zhang Y F. Dew formation characteristics in a revegetation-stabilized desert ecosystem in Shapotou area, Northern China. *J Hydrol*, 2010, 387: 265–272
- 46 Li X R, Kong D S, Tan H J, et al. Changes in soil and in vegetation following stabilisation of dunes in southeastern fringe of the Tengger Desert, China. *Plant Soil*, 2007, 300: 221–231
- 47 张志山, 李新荣, 王新平, 等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾测定. *生态学报*, 2005, 25: 2484–2490
- 48 张志山, 李新荣, 何明珠, 等. 沙漠人工植被蒸渗池测定及蒸腾量推算. *草业学报*, 2006, 15: 32–37
- 49 冯金朝, 黄子琛, 张承烈, 等. 环境植物生理学定量研究的若干进展. *中国沙漠*, 1997, 17: 89–94
- 50 李小军, 谭会娟, 张志山, 等. 油蒿不同部位水分关系研究. *中国沙漠*, 2007, 3: 448–454
- 51 张志山, 张小由, 谭会娟, 等. 热平衡技术与气孔计法测定沙生植物蒸腾. *北京林业大学学报*, 2007, 29: 60–66
- 52 Huang L, Zhang Z S, Li X R. Sap flow of *Artemisia ordosica* and the influence of environmental factors in a revegetated desert area: Tengger Desert, China. *Hydrol Proc*, 2010, 24: 1248–1253
- 53 王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态. *水科学进展*, 2003, 15: 75–81
- 54 Zhou H Y, Li S G, Li X R, et al. Ecophysiological evidence for the competition strategy of two psammophytes *Artemisia halodendron* and *A. frigida* in Horqin sandy land, Nei Mongol. *Acta Bot Sin*, 2004, 46: 284–293
- 55 周海燕, 张景光, 赵亮, 等. 极端条件下几种锦鸡儿属灌木的生理特性. *中国沙漠*, 2005, 25: 182–190
- 56 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. *中国沙漠*, 2002, 22: 363–367
- 57 Wang X P, Berndtsson R, Li X R, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area. *Hydrol Sci J*, 2004, 49: 283–295
- 58 Wang X P, Kang E S, Zhang J G, et al. Evapotranspiration of *Artemisia ordosica* vegetation in stabilized arid desert dune in Shapotou, China. *Arid Land Res Manag*, 2004, 18: 63–76
- 59 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. *Biol Fert Soils*, 2002, 35: 147–154

- 60 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. 中国沙漠, 2005, 25: 166-172
- 61 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变. 中国沙漠, 2003, 23: 605-611
- 62 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变对水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40: 809-814
- 63 Li X R, He M Z, Zerbe S, et al. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales. *Earth Surf Proc Land*, 2010, 35: 932-940
- 64 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 Arid Environ*, 2008, 72: 1675-1683
- 65 冯金朝, 刘新民. 干旱环境与植物的水分关系. 北京: 中国环境科学出版社, 1998
- 66 杜岳, 姚德良, 李新荣, 等. 考虑生物结皮影响的陆气湍流模式研究. 中国沙漠, 2002, 12: 545-552
- 67 刘树华, 张景光, 刘昌明, 等. 荒漠下垫面陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验. 中国沙漠, 2002, 12: 636-644
- 68 姚德良, 李家春, 李新荣, 等. 干旱区陆面过程野外观测研究. 中国沙漠, 2001, 21: 254-259
- 69 Shuttleworth W M, Wallace J S. Evaporation from sparse crops—An energy combination theory. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1985, 111: 839-856
- 70 Noilhan J, Lacarrere P, Dolman A J, et al. Defining area-average parameters in meteorological models for land surfaces with mesoscale heterogeneity. *J Hydrol*, 1997, 190: 302-316
- 71 Pelgrum H, Bastiaanssen W G M. An inter-comparison of techniques to determine the area-averaged latent-heat flux from individual *in-situ* observations—A remote-sensing approach using the European field experiment in a desertification-threatened area data. *Water Resour Res*, 1996, 32: 2775-2786
- 72 杨诗秀, 雷志栋, 刘元波, 等. 裸沙地降雨入渗水分动态分析. 见: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站, 编. 沙漠生态系统研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 62-68
- 73 刘元波, 杨诗秀. 积水条件下裸平沙地入渗湿润锋速度变化规律. 见: 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站, 编. 沙漠生态系统研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 69-74
- 74 王新平, 李新荣, 张景光. 格状沙丘植被区降水入渗过程. 中国沙漠, 2002, 22: 534-540
- 75 黄磊. 干旱沙区植被-土壤水分关系试验及模拟研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2011
- 76 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. 草业学报, 2006, 15: 129-135
- 77 Klausmeier C A. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation. *Science*, 1999, 284: 1826-1828
- 78 Kéfi S, Rietkerk M, Alados C L, et al. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 2007, 449: 213-217
- 79 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 361-370
- 80 黄磊, 张志山, 吴攀. 沙坡头地区降雨量时间序列的小波分析. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46: 63-66
- 81 李新荣, 金炯. 中国沙漠研究与治理 50 年. 北京: 海洋出版社, 2005
- 82 Cao S X. Why Large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem. *Environ Sci Tech*, 2008, 42: 1826-1831
- 83 Li X R, Chen Y W, Su Y G, et al. Effects of biological soil crust on desert insect diversity: Evidence from the Tengger Desert of northern China. *Arid Land Res Manag*, 2006, 20: 1-18
- 84 Belnap J, Eldridge D J. Disturbance and recovery of biological soil crusts. In: Belnap J, Lange O L, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 363-384
- 85 Li X R, He M Z, Li X J, et al. Cryptogamic communities in biological soil crusts in arid deserts of China: Diversity and their relationships to habitats in different scales. *EGU Geophysical Research Abstracts*, 2012, 14: 2187
- 86 苏延桂, 李新荣, 陈应武, 等. 温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对荒漠藻结皮光合作用的影响. 应用生态学报, 2010, 21: 2217-2222
- 87 孙鸿烈, 张荣祖. 中国生态环境建设地带性原理与实践. 北京: 科学出版社, 2004
- 88 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18: 1-16
- 89 Li X R. Study on shrub community diversity of Ordos Plateau, Inner Mongolia, Northern China. *J Arid Environ*, 2001, 47: 271-279
- 90 Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of "fertile islands" in the desert ecosystem. *J Arid Environ*, 1989, 16: 257-262
- 91 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 包兰铁路沙坡头段固沙原理与措施. 银川: 宁夏人民出版社, 1991
- 92 李新荣, 谭会娟, 何明珠, 等. 阿拉善高原灌木种的丰富度和多度格局对环境因子变化的响应: 极端干旱荒漠地区灌木多样性保育的前提. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 504-515
- 93 Sala O E, Lauenroth W K, Golluscio R A. Plant functional types in temperate semi-arid regions. In: Smith T M, Shugart H H, Woodward F I, eds. *Plant Functional Types*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 217-233
- 94 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应. 地球科学进展, 2008, 23: 685-691

- 95 Jia R L, Li X R, Liu L C, et al. Responses of biological soil crusts to sand burial in revegetated area of the Tengger Desert, Northern China. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40: 2827–2834
- 96 Le Houérou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review. *Arid Soil Res Rehab*, 2000, 14: 3–14
- 97 慈龙骏. 极端干旱荒漠的“荒漠化”. *科学通报*, 2011, 56: 2616–2626
- 98 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔里木沙漠公路防护林植物水分状况. *科学通报*, 2008, 53(增刊 II): 146–155
- 99 单立山, 张希明, 王有科, 等. 水分条件对塔里木沙漠公路防护林植物幼苗生长及生物量分配的影响. *科学通报*, 2008, 53(增刊 II): 82–88
- 100 陈应武, 张志山, 郑敬刚, 等. 沙漠人工植被地上部分生长动态. *西北植物学报*, 2006, 26: 1819–1826
- 101 张景光, 李新荣, 王新平, 等. 沙坡头人工植被固沙区一年生植物的生态适应对策. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(增刊): 47–56
- 102 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). *Arid Land Res Manag*, 2008, 22: 195–211
- 103 张景光, 张志山, 王新平, 等. 沙坡头人工固沙区一年生植物小画眉草繁殖分配研究. *中国沙漠*, 2005, 25: 202–206
- 104 马凤云, 李新荣, 龙利群, 等. 沙坡头地区人工植被油蒿种群结构与更新的研究. *中国沙漠*, 2002, 22: 571–575
- 105 徐军, 李青丰, 王建光, 等. 沙坡头人工植被区中的油蒿种群动态与稳定性. *中国沙漠*, 2002, 22: 591–597
- 106 冯丽, 张景光, 张志山, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被中油蒿的生长及生物量分配动态. *植物生态学报*, 2009, 33: 1132–1139
- 107 李青丰, 王建光, 徐军. 沙坡头铁路北侧人工植被区油蒿苗和小画眉草的分布格局. *中国沙漠*, 2002, 22: 628–631
- 108 张景光, 李新荣, 王新平, 等. 人工固沙区一年生植物异速生长动态研究. *中国沙漠*, 2002, 22: 607–611
- 109 张景光, 李新荣, 王新平, 等. 沙坡头地区固定沙丘一年生植物小画眉草种群动态研究. *中国沙漠*, 2001, 21: 232–235
- 110 张景光, 王新平, 李新荣, 等. 荒漠植物生活史对策研究进展与展望. *中国沙漠*, 2005, 25: 306–314
- 111 肖洪浪, 程国栋, 李新荣, 等. 腾格里沙漠东南缘雨养人工生态系统 40 a 生态水文变化机理初研. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(增刊): 66–72
- 112 Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China. *Geomorphology*, 2008, 96: 221–232
- 113 Sivapalan M, Kalma J D. Scale problems in hydrology: Contributions of the Robertson Workshop. In: Kalma J D, Sivapalan M, eds. *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Chichester: Wiley and Sons, 1995. 1–8
- 114 Belnap J, Phillips S L, Troxler T. Soil lichen and moss cover and species richness can be highly dynamic: The effects of invasion by the annual exotic grass *Bromus tectorum*, precipitation, and temperature on biological soil crusts in SE Utah. *Appl Soil Ecol*, 2006, 32: 63–76
- 115 Maestre F T, Huesca M T, Zaady E, et al. Infiltration, penetration resistance and microphytic crust composition in contrasted microsites within a mediterranean semi-arid steppe. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34: 895–898
- 116 Kidron G J, Yair A, Vonshak A, et al. Microbiotic crust control of runoff generation on sand dunes in the Negev Desert. *Water Resour Res*, 2003, 39: 1108–1112
- 117 Warren S D. Synopsis: Influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability. In: Belnap J, Lange O L, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 349–360
- 118 Williams J D, Dobrowolski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity. *Arid Soil Res Rehab*, 1999, 13: 145–154
- 119 Eldridge D J, Zaady E, Shachak M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. *Catena*, 2000, 40: 323–336
- 120 Malam Issa O, Défarge C, Trichet J, et al. Microbiotic soil crusts in the Sahelian part of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics. *Catena*, 2009, 77: 48–55
- 121 胡春香, 张德禄, 刘永定, 等. 荒漠藻结皮的胶结机理. *科学通报*, 2002, 47: 931–937
- 122 Ludwig J A, Wiens J A, Tongway D J. A scaling rule for landscape patches and how it applies to conserving soil resources in Savannas. *Ecosystems*, 2000, 3: 84–97
- 123 Cable J M, Huxman T E. Precipitation pulse size effect on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, 2004, 141: 317–324
- 124 Belnap J, Phillips S L, Miller M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency. *Oecologia*, 2004, 141: 306–316
- 125 Miriti M N. Twenty years of changes in spatial association and community structure among desert perennials. *Ecology*, 2007, 88: 1177–1190
- 126 Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate, soil and vegetation. *Proc R Soc London-Ser A*, 1999, 455: 3789–3805

- 127 Jankju-Borzelabad M, Griffiths H. Competition for pulsed resources: An experimental study of establishment and coexistence for an arid land grass. *Oecologia*, 2006, 148: 555–563
- 128 Neilson R P. A model for predicting continental scale vegetation distribution and water balance. *Ecol Appl*, 1995, 5: 362–385
- 129 Rietkerk M, Dekker S C, de Ruiter P C, et al. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, 2004, 305: 1926–1929
- 130 Barbier N, Couteron P, Lefever R, et al. Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gapped vegetation patterns. *Ecology*, 2008, 89: 1521–1531