

# 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述

李新荣<sup>1,2</sup>, 赵 洋<sup>1,2</sup>, 回 嵘<sup>1,2</sup>, 苏洁琼<sup>1,2</sup>, 高艳红<sup>1,2</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实验站, 兰州 730000;  
2. 甘肃省逆境生理生态研究重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要:**本文评述了中国干旱区恢复生态学研究的历程和特点,系统分析了其研究前沿和未来发展趋势。国家重大需求推动了干旱区恢复生态学研究,植被建设是生态恢复的主要方法和手段;植被分布的地带性规律、土壤生境的恢复、生态水文互馈机理、植物水分关系、生物土壤结皮、基于模型的预测模拟是未来研究的重点;地质与生物学的学科交叉融合为干旱区恢复生态学理论创新和生态恢复实践提供了新的思路和途径。

**关 键 词:**干旱荒漠地区;内陆河生态恢复;土壤生境恢复;风沙危害;人工植被重建与恢复;生态水文过程

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.11.001

中图分类号:X171

文献标识码:A

## 1 引言

全球干旱土地主要分布在地球南北回归线附近15~30°之间地区,属副热带高压带的控制范围。干旱区常指降水小于200 mm,以风沙地貌或荒漠地貌为主,植被稀疏和水资源短缺的地区,是全球贫困人口的主要分布区。由于青藏高原的隆起和存在,中国干旱区地跨甘肃、宁夏、青海、新疆和内蒙古的西部地区,主要分布在35°N以北和106°E以西之间,包括新疆全境、甘肃河西走廊及内蒙古鄂尔多斯以西的地区,约占全国陆地面积的1/4,是中国生态环境最为严酷和脆弱的地区之一,也是许多重要的能源、工矿、畜牧、国防与航天基地,交通枢纽(青藏线、包兰线等),及文化遗产和少数民族与贫困人口的集中分布区,在西部大开发和国家发展战略中地位重要,是古丝绸之路的重要分布区。

近半个世纪以来,受人类活动和气候变化的影响,该地区绿洲退化、湿地萎缩、沙尘频发、工矿污染、土地与草场沙化加剧,不仅危及当地农牧民的生存和发展,而且对中国北方生态安全和社会经济发展构成严重威胁。其中荒漠化(主要为沙漠化和盐渍化)是该区主要的环境问题。为有效遏制风沙危害和荒漠化的不断扩张,国家已在这些区域实施了一系列以植被重建为主要措施的生态恢复与重

建工程,有效地缓解了当地的土地沙化,促进了区域生态恢复(Xiao, 1994),同时,大量的生态恢复实践与生态工程建设为恢复生态学学科发展与理论研究提供了良好的机遇和支撑。

## 2 干旱区生态恢复的实践和特点

随着环境污染、植被破坏、土地退化、水资源短缺、气候变化和生物多样性丧失等环境问题的不断突显,20世纪80年代,恢复生态学应运而生,其主要致力于那些在自然灾害和人类活动影响下受到破坏和威胁的自然生态系统的恢复与重建,它对检验生态学理论,加强生态系统建设和优化管理以及生物多样性的保护等方面具有重要的理论和实践意义(Dobson et al, 1997),并为解决生态安全、生态服务、生态健康和社会生态福祉问题提供方法论。如今恢复生态学已成为具有重大社会需求的前沿领域之一,在全球范围内的可持续发展中发挥了重要作用(Roberts et al, 2009; 傅伯杰, 2010; 张新时, 2010)。

中国是在干旱区较早开展生态恢复实践和研究的国家之一。干旱区主要的生态问题是风沙危害,而恢复措施以通过人工植被建设促进恢复为主。从20世纪50年代就开始了退化生态系统的长

收稿日期:2014-09;修订日期:2014-10。

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429900)。

作者简介:李新荣(1966-),男,甘肃武山人,研究员,博士生导师,主要从事干旱区恢复生态学和植被水分生态学研究,

E-mail: lxinrong@lzb.ac.cn。

期定位观测试验和综合整治研究,如中国科学院沙坡头沙漠研究实验站始于1956年的风沙防治与人工植被建设与恢复的长期生态学研究。50年代末,在中国北方干旱区开展了荒漠生态系统的恢复,针对风沙危害进行了植物固沙研究、干旱区绿洲防护体系建设、防风固沙林带的营建和流动沙丘的固定,以及干旱区绿洲护田林网的营建(朱震达等,1998)。70年代,针对中国西北、华北、东北地区风沙危害和水土流失的状况,“三北”防护林工程开始建设。80年代末在农牧交错区、风蚀水蚀交错区、干旱荒漠区进行了退化或脆弱生态系统恢复重建研究与试验示范。90年代针对毛乌素沙地的恢复等提出了许多生态恢复、重建技术与优化模式(孙书存等,2005)。在21世纪初,内陆河流域(塔里木河、黑河和石羊河)通过生态调水缓解了下游河岸林的大规模退化,为今后进一步恢复提供了先决条件(陈亚宁等,2008; Zhao et al, 2010)。

在以上的生态恢复实践中,逐步形成了以下具有代表性的生态恢复模式,有效地促进了区域环境的改善。例如,极端干旱区绿洲沙害防治与生态恢复模式(新疆和田模式),该模式以绿洲为中心建立人工植被防护体系,合理利用内陆河水资源,提出合理的生态用水和防护体系的适宜规模,在促进绿洲生产力的前提下确保了绿洲的稳定性;干旱区绿洲荒漠过渡带沙害治理模式(甘肃临泽模式),该模式重点突出了绿洲内部护田林网、绿洲过渡区乔灌结合的防沙林,绿洲外围沙丘地段的沙障与栽植固沙植物相结合的固沙带和沙丘固定带外围的封沙育草带,通过考虑不同防护带生态需水与绿洲稳定性之间的关系,成为内陆河生态恢复的成功模式;包兰铁路沙坡头地区植被防护体系模式开创了我国干旱区无灌溉人工植被建设与生态恢复的先河,近60余年来不仅原有的人工植被能够自我修复,维持稳定的状态,而且使局地环境发生了巨大的改变,原来以流沙为主的景观变成与同一生物气候带相符的荒漠植被景观。上述生态恢复模式的建立,为我国防沙治沙、干旱区生态恢复和恢复生态学在干旱区的发展奠定了基础。

### 3 研究热点与进展

人工植被建设是干旱区生态恢复的重要途径,也是恢复生态学研究的主要内容。针对干旱区生

态退化的特点和生态恢复实践中所遇到的科学问题,近60年来,在以下几个方面取得了显著的进展。

#### 3.1 干旱区植被格局的“二分法”理论假说及其在生态恢复中的应用

许多学者在研究干旱退化草场或沙漠化过程的植被格局变化时,发现土壤质地中沙粒的百分含量与群落中木本植物的优势度呈正相关关系(李新荣等,2004; Li et al, 2009)。Sala等从退化草地气候条件和土壤质地两方面因素考虑,认为在未来区域气候条件(如月降水和温度)相对变化较小的前提下,群落中木本植物与草本植物的优势度取决于土壤质地(Sala et al, 1997)。大多数具有较高细粒(粉粒和粘粒)百分含量质地的土壤以草本植物的覆盖为优势,而质地较粗的土壤则有利于木本植物。对于干旱区植被格局的“二分法”理论较为合理的解释是Walter(1979)的土壤水分资源双层分布利用模型(two-layer model)。该模型指出,深根系的灌木可以在较深的土层中获得水分资源,而深层土壤含水对浅根系的草本是无效的。表土层较粗的土壤质地有利于降水的入渗,使深层得到水分补给,深层较细的质地有利于水分的保存,使深根系植物得到水分的供应。相反,表土层质地较细有利于表土层水分的贮存,不利于降水的入渗,使浅根系的草本植物更易获得有限的水分。深根系灌木因得不到足够的水分而逐渐从群落中退出(Dodd et al, 2002)。中国干旱沙漠地区人工固沙植被长期演变的定位研究也支持了这一理论假说,并且在植被重建与恢复实践中成功地应用了植被格局中不同生活型植物的优势地位,在沙地或因沙埋破坏的草场植被恢复中采用栽植木本旱生灌木而不用草本,在干旱黄土区或质地较细的退化草地恢复中采用草本而不用灌木或乔木。植被重建与恢复实践中遵循的植被格局与土壤质地关系理论为干旱区生态恢复起到了重要的作用,确保了人工植被的可持续性(Li, Kong et al, 2007)。

#### 3.2 干旱区人工植被的恢复、演替及驱动机理

针对干旱区草场的沙漠化和因沙漠扩张造成的农田、绿洲、草地和交通干线沙害,中国利用人工植被建设进行生态恢复已有50多年的历史。包兰铁路沙坡头段植物固沙防护体系长期的监测研究表明,人工植被在水分变化的驱动下发生了明显的演替。原来高密度、种类相对单一,以乔木为优势



的植被发生了大面积的衰退(Li, Kong et al, 2007; Li et al, 2013), 而种植密度和盖度小、种类组成多样、以旱生灌木为主的人工植被则具有很好的稳定性, 反映在植被具备了自我更新和调节的功能。除优势灌木种具备了自我更新能力外, 大量的一年生草本开始在固定沙面定居和繁衍, 其中一些多年生草本和大量的隐花植物出现在固沙植被组成中。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(Li, 2005)。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栽植的灌木种外, 群落中增加了C4植物和隐花植物的比例。C4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, 蓝藻和地衣的固氮为氮素贫乏的沙地系统输送了大量的氮, 并为草本植物繁衍提供了珍贵的养分。从固沙的角度看, 生物土壤结皮有效地固定了沙面, 遏制了植被区沙尘向大气的输送。人工植被的这种逐渐趋于稳定的演替主要受土壤水文过程变化的驱动(Li, Zhang et al, 2014)。人工植被的建立逐步改变了沙丘土原有的水文过程和水循环特征, 植被冠层对降水的截留、地表蒸发和不同层片植物的水分利用, 特别是生物土壤结皮对入渗的影响使有限降水条件下土壤水分浅层化, 即有利于草本等浅根系的植物, 而不利深根系的灌木种类, 使植被在组成上木本植物保持较低的盖度, 而在相同气候带分布的草本植物得到发展(李新荣, 张志山等, 2009; Li et al, 2010)。

### 3.3 干旱区植被系统恢复与退化理论模型

在干旱区植被重建与恢复实践中, 人工植被系统的恢复与退化除了取决于优势建群种能否自我更新之外, 系统的自我调节能力受到了很大的关注(Li, Zhang et al, 2014)。例如随着人工固沙植物的生长, 因风蚀被流沙覆盖的地表得到固定, 大气降尘和植物凋落物在地表沉积和积累(Li et al, 2006), 特别是生物土壤结皮在地表的发育和繁衍, 增大了固沙植被区表土层的持水能力, 即增大了对降水的拦截, 减少了入渗, 使原来种植的深根系灌木(优势种)得不到降水的补给而衰退。然而, 随着沙丘的固定, 促进了沙面成土过程, 大量微小生物在土层开始定居, 例如蚂蚁(挖掘蚁)的出现使原来被生物土壤结皮覆盖的沙面出现了大量的蚁穴(Chen et al, 2012), 其存在显著地增加了降水的入渗, 减缓了

表土层对降水的截留, 使一定数量的降水能够补给到深层土壤, 进而维持了较低盖度灌木在固沙植被中的存活和发展。人工植被系统发生的这些生物干扰是生态系统健康和能够自我调节的重要标志, 是衡量系统恢复与退化的重要依据(Li, Zhang et al, 2014)。此外, 沙区人工固沙植被恢复过程的长期生态学研究表明, 土壤属性(理化和生物学属性)、尤其是土壤水分分布的异质性程度很好地反映了生态系统的恢复和退化。在没有受到干扰或干扰较少的荒漠草地, 其土壤属性特征的分布相对均一, 即具有较低的空间异质性; 而受到干扰较大, 如过度放牧和地表严重风蚀的荒漠草地, 由于受侵蚀的搬运, 其土壤属性特征的分布具有很高的空间异质性。植被的重建和演替恢复过程促进了土壤属性异质性程度变高再降低的过程, 即地表因植被、尤其是相对均一的草本覆盖, 减弱了干扰和风蚀进而使表层土壤资源分布相对均一(Li, 2005)。这一模型解释了中国干旱沙区人工植被演变的机理, 对未来植被的建设和已有人工植被的生态管理具有重要的理论价值(Li, Gao et al, 2014)。

### 3.4 干旱区土壤生境恢复与生态系统的恢复

Li等通过对腾格里沙漠南缘地区植被—土壤系统土壤特性的恢复过程和恢复速率的模拟研究(Li, He et al, 2007), 认为干旱荒漠地区土壤生境的恢复是一个十分漫长的过程, 在人为促进下土壤理化和生物学属性的恢复在初期相对较快, 而在恢复的后期较慢。尽管降水对干旱区生态恢复起着至关重要的作用, 但是土壤生境的恢复是生态系统全面恢复的根本。植被的盖度对降水的脉冲波动具有很大的依赖性, 然而简单地根据干旱区植被盖度的这种时空动态很难科学判别生态系统的恢复和可持续性。较大的降水会显著地增加植被的盖度, 但在干旱区对植被总盖度贡献最大的是是一年生植物而非多年生和地带性植物种, 当丰水年过后, 持续的干旱又会使植被覆盖稀疏, 究其原因主要是土壤生境并未因一时较好的降水而得到恢复。通过对土壤属性恢复特征的比较(Li, 2005; Li et al, 2013), Li等认为, 土壤表面稳定性增强、土壤结构和微生物过程的恢复对整个植被—土壤系统的恢复具有重要的指示作用(Li, He et al, 2007)。因此, 在干旱区进行生态重建与恢复时, 必须考虑土壤生境的恢复, 如利用沙障减缓沙区地表风蚀, 增加地表粗糙度而有利于大气降尘的沉积和表土层的微

生物拓殖繁衍;利用“生物垫”增加人工植被中草本植物层片,有利于生物土壤结皮的发展,进而增加土壤的养分(生物土壤结皮可进行N和C的固定)。Li等(2002)提出,利用生物土壤结皮的盖度代替传统的植被盖度来指示生态系统恢复(沙漠化逆转)或退化(沙漠化发展)的观点。因为不同演替阶段的生物土壤结皮可较客观地反映表土层恢复的状况,当干旱生态系统以蓝藻为优势结皮覆盖时,说明系统承受的干扰较大,表土层风蚀较严重,系统处于不稳定状态或退化过程;当系统中以较大盖度的地衣和藓类为主的生物土壤结皮覆盖时,说明系统承受的干扰较少,表土层可抵御风蚀,此时的生物土壤结皮对土壤的C、N输入和微生物过程的贡献大于前者,系统趋于稳定或恢复(李新荣, 2012)。

### 3.5 沙化草地综合治理与生态恢复的“三圈”理论范式

针对沙化草地的综合治理与恢复,除了考虑沙和水外,土壤基质与养分也是重要的生态控制因子。从有利于生态系统水分和养分保存的观点出发,认为中国内蒙古毛乌素沙地的植物应属于由灌木和草本植物构成的复合群落,植被盖度维持在30%~40%较为适宜。这是因为,一方面复合群落的生态环境效益比单一群落要好;另一方面,这一灌丛密度有利草本层的发育,从而避免因土壤侵蚀造成的生态系统水分和养分的流失(张新时, 1994)。经过长期定位监测研究,张新时(1994)和慈龙俊等(2007)基于毛乌素沙化草地时空分布格局(硬梁地、软梁地、覆沙梁地和滩地等)和植被自然地带性的特征,提出了沙化草地区域生态恢复和荒漠化防治的“三圈”范式。即:第一圈为滩地绿洲高生产力核心圈,主要发展农、林、果、牧、药等复合高效农业体系;第二圈为软梁沙地半人工草地和低矮沙丘,主要发展人工灌草;第三圈为硬梁地与高大和半固定沙丘,主要作用为减缓人为干扰和压力,人为促进恢复。广义的“三圈”理论范式主要是针对中国沙化土地分布、生态脆弱性和生态建设布局提出的,是大尺度的荒漠化防护圈。可将干旱荒漠区、北方温带草原和农牧交错带作为不同结构、服务功能的“圈层”来进行恢复。“三圈”范式的建设主要遵循以土壤水为核心,生物气候条件为基础的生态规划原则,以及以灌木为主、植被防护体系结构与配置和半固定沙地综合治理原则(慈龙俊等, 2007)。

### 3.6 内陆河流域生态系统恢复

绿洲主要分布于内陆河流域,在人类活动对流域水循环过程改变较为明显之前,主要以天然绿洲为主。由于人口的持续增加,人工绿洲不断扩张。流域原来的水循环格局发生明显改变,导致人工绿洲增加的同时,天然绿洲退化甚至萎缩,流域生态环境出现了以沙漠化为主要标志的退化问题。在维持流域生态环境协调发展目标的前提下,天然绿洲与人工绿洲的分布比例,生态用水和生产用水的分配,以及建立怎样的绿洲规模、现状和结构才能使绿洲的水资源发挥最大效益等问题的研究成为热点。针对内陆河流域生态恢复中的关键科学问题,即绿洲生态恢复、稳定性与水资源的可持续性,以黑河和塔里木河流域的长期定位研究为依托,研究了绿洲耗水和生态需水,提出了生态恢复中植被的临界需水量、最适生态需水和饱和生态需水的理论体系(Zhao et al, 2008)。认为维系生态系统正常运转的水分应在植被耗水量的基础上再加25%的水分,利用这一人工可调控的量,通过适宜的生态工程建设可促进内陆河流域绿洲生态系统的恢复和稳定性的维持,通过生态需水这一阈值来进行绿洲生态系统的管理。

针对荒漠绿洲过渡带的生态恢复,认为大量的植被建设会消耗掉宝贵的水资源,而用最小的水资源消耗建立稳定的绿洲防护体系是节水高效绿洲建设的关键。通过对绿洲防护体系结构、格局、防护效益和耗水关系的研究,得到在绿洲与荒漠之间过渡带1.5 km左右时防护效益和节水效益达到最优临界值的结论(慈龙俊等, 2007; Liu et al, 2010),并在此基础上提出了防(农田防护林网)—封(封沙育草带)—固(植物固沙带)—阻(前沿阻沙带)为一体的“四带一体”绿洲防护体系建设技术,雨养植被和灌溉植被相结合、稀疏植被的斑块状和聚集状配置方式(Jia et al, 2012),为荒漠绿洲过渡带生态恢复提供了样板且获得了良好的生态防护效应和节水效益。

### 3.7 水文过程对干旱区生态恢复的影响

水分因子是干旱沙区生态格局和过程的驱动力(Su et al, 2007),水文过程控制着植被的时空分布格局和生态过程(Schlesinger et al, 1996)。植被格局和过程的长期改变也从根本上影响着土壤的水文过程,特别是植被组成和结构的变化改变了生态系统对水分的利用,包括耗水量/需水量和水分的利用



方式。人工植被系统的水文过程及其变化机理是干旱区生态恢复重建中必须面对的基础科学问题(Li et al, 2013)。在典型固沙植被区结合长期定位监测研究,揭示了沙区植物冠层、生物土壤结皮对水分分配的影响(Li et al, 2010; Wang et al, 2010);量化了沙区土壤水分的时空分布格局(Pan et al, 2008);分析了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以及植被格局维持机制(Li et al, 2004; 张景光等, 2005; Li et al, 2010);建立了植被格局与降水间的动态关系模型,归纳出了土壤水分与相关生境因子异质性长期动态以及基于水量平衡的干旱区生态恢复理论模式(Li, He et al, 2007; Li, Kong et al, 2007);探明了腾格里、毛乌素等沙区部分植物对土壤水分变异的形态调整对策和调控阈值(Zhang et al, 2004; Zhang et al, 2008)。

## 4 未来发展趋势

地学与生物学的进一步学科交叉融合为恢复生态学理论创新和生态恢复实践提供了新的思路和途径。尤其在目前国内外以植被建设作为重要恢复手段的前提下,植被分布的地带性规律及其理论,水文过程对植被演替的驱动作用,植被变化对水循环的调控机理,和土壤生境恢复是未来恢复生态学理论研究新的突破口。

### 4.1 植被地带性分布及演替规律是干旱区生态恢复与植被建设的重要理论基础

植被的地带性分布规律对大尺度、大规模植被建设与生态恢复具有重要的指导和借鉴意义。人工植被建设必须符合相邻生物气候带植被的分布规律。例如在荒漠化草原地带,当利用植被建设促进草地恢复时,植被建设应选择当地优势旱生灌木为主,且盖度不宜超过天然植被的盖度,但沙面固定后,相同气候带的草本和优势植物种会逐渐定居和繁衍,所形成的植被具有自我更新和稳定的功能与结构。在草原化荒漠区,旱生灌木是群落的优势种,在建立人工植被时也宜采取灌木种而不选择乔木种。总之,遵循植被分布的地带性和演替规律是决定人工植被未来稳定性的关键因素(孙鸿烈等, 2004)。因此,针对干旱区不同生态系统退化的特征和时空分布异质性,分析局地植被的组成、结构和功能的分布和演替规律,对人工植被系统的可持续发展具有重要的指导作用。

### 4.2 土壤生境恢复是干旱区生态系统恢复研究的重要方向

如何恢复受损的土壤系统,促进生态系统功能的提高,成为生态恢复的前沿难点问题(Coleman et al, 2004)。这是因为土壤的恢复过程复杂,且土壤异质性程度高,区域特征明显,恢复技术和方法不能通用;加之干旱区土壤盐碱化、重金属污染和土壤有机物形成等问题仍未得到很好的解决(Hobbs et al, 2001; Callahan et al, 2008)。因此,仍然需要深入揭示退化土壤对其他组分(植物、土壤动物和微生物等)的影响强度和规律以及其他组分与土壤间的相互关系和相互作用。通过改进土壤恢复技术,提高土壤恢复质量,探索人工缩短土壤恢复周期的方法,改良和修复污染及盐碱化土壤,恢复土壤生态功能。

此外,土壤生物(动物、微生物、菌根)在干旱区生态恢复中十分重要,是未来恢复生态学研究的热点和重要方向。土壤生物是地表环境系统中物质迁移和能量转换过程中的关键因子,而土壤环境要素则为不同类型的土壤生物提供了基本的生存条件,土壤环境要素的特征及变化规律直接决定了土壤生物的生存状态,土壤生物对于土壤环境的改变也有较明显的指示作用(王移等, 2010)。它们在受到土地利用方式、植被类型、地形和区域气候等外部环境要素和土壤理化性质、水分含量、氧气条件和污染物等土壤环境要素的影响下,在种类、数量、群落结构和多样性等方面会显示出不同程度的变化,对生态系统的受损或恢复具有重要的指示作用(Hemerik et al, 2002; Frouz et al, 2007)。土壤生物对退化土壤的治理作用明显,它可以有效地提高土壤有机质含量、增加团聚体结构、加速养分循环等(Scullion et al, 2000; 张宇博等, 2008),是干旱区恢复生态学研究的重要方向。

### 4.3 生态水文过程及互馈机制是干旱区恢复生态学发展的理论基础

干旱区所支撑的复杂多样的生态系统是全球陆地生态系统的重要组成部分,水是干旱区诸多生态系统过程的驱动力和关键的非生物限制因子(Noy-Meir, 1985; Schlesinger et al, 1996)。认知生态水文过程及其相互作用的机理是干旱区生态重建与恢复,以及实现人为促进可持续发展的重要前提(Li et al, 2013)。尽管中国在局地尺度上的生态水文过程监测和研究取得了一定进展,但较大尺度的

植被—土壤系统的生态水文学联网研究少,这使得成果的推广应用受到一定的局限(Li et al, 2013; Li, Zhang et al, 2014)。此外,在不同的生物气候带,人工植被系统的生态水文过程及互馈作用机理不同,如在中国东部沙区(呼伦贝尔、科尔沁、浑善达克、毛乌素沙地),人工固沙植被主要依赖于降水,降水的时空分布和在植被—土壤系统中的再分配(土壤水)决定着植被的水量平衡和系统的稳定性;在贺兰山以西的干旱沙区,地下水在很大程度上决定着人工固沙植被的稳定性,高密度与高盖度的植被,尤其是乔木固沙植被往往引发地下水下降,进而导致植被退化。因此,在不同的生物气候区对人为促进的生态恢复均存在着一个阈值,而这个阈值不仅是一个生态阈值,应该是一个涵盖植被群落学特征(如植物的功能群组成、盖度与层片结构,以及种类多样性和空间格局与配置特征)和水文过程特征(降水、地下水、土壤含水量,以及土壤水的植被承载力)的阈值,即生态水文阈值(Li et al, 2013; Li, Zhang et al, 2014)。因此,基于生态水文阈值,提出干旱区人为促进生态恢复与重建的范式是今后干旱区恢复生态学研究的重要方向和未来的发展趋势。

#### 4.4 植物—水分关系研究是干旱区恢复生态学研究的热点问题

植物—水分关系是联系干旱区生态过程和水文过程的纽带,其机理研究从20世纪30年代至今反映在分子、器官、个体、种群、群落和生态系统等不同水平上。从分子到生态系统水平研究植物适应水分胁迫及其机理是干旱区恢复生态学理论研究的新方向。

近年来利用分子生物学的手段和方法,揭示了一些与植物抗旱相关的基因在植物水分和离子运输、渗透调节、抗氧化与活性氧清除、转录调控和信号传导等过程中的作用(Oliver et al, 2010; Pareek et al, 2010)。利用X射线晶体学方法成功解析植物激素ABA增强植物抗旱性的研究,为今后植物抗旱的分子机理研究开辟了新的途径(Fonteyn et al, 1981)。但是,目前对于干旱区植物抗旱性的分子生物学机理研究多局限于一些抗旱蛋白的研究(Scott, 2000)。

植物器官和个体水平的水分胁迫适应以形态和结构的变化为主,相关研究以根、茎和叶作为切入点。旱生植物的根、茎和叶的形态和结构便于水

分的吸收和运输。旱生植物器官和个体形态结构的多样性直接导致了其对干旱环境适应机制的多样性(Hickey et al, 2001)。但相关研究多以定性描述为主,相互作用机理量化研究有待深化。人工植被在种群、群落和生态系统水平上对水分利用和水分胁迫的适应性表现为植物间的协同作用,如一个植物可为相邻植物提供遮荫。协同作用使沙区植物对环境水分胁迫的适应能力增强(Tewksbury et al, 2001)。同样,沙区植被中存在不同光合碳代谢途径的植物混生现象(C3和C4植物)。通过调节叶形态和水分生态位等,对水分利用表现出显著的“互补效应”(Ward et al, 1999)。植物对水分胁迫的响应表现在诸多层面,虽然在分子、器官和个体水平适应机制研究方面有了长足的进展,但在种群、群落和生态系统水平的适应机制研究亟待加强。种群以上水平的水分关系研究是干旱区构建人工植被的重要理论依据,直接关系到人工植被系统的种类组成、群落结构和功能群落构建等生态设计和措施的制定。

#### 4.5 生物土壤结皮在干旱区生态恢复中的作用

生物土壤结皮是干旱荒漠地表景观的重要组成部分之一。由于受非生物因素的胁迫,高等植物群落斑块状的分布为生物土壤结皮的繁衍提供了适宜的生境,使其覆盖在干旱区占活体覆盖面积的40%以上。作为荒漠生态系统的生态系统工程师(West, 1990),生物土壤结皮在联系干旱、半干旱景观地表生物与非生物成分中起着无法替代的作用。土壤过程、水文过程以及生物过程是干旱区生态恢复的重要过程,生物土壤结皮对上述3个“过程”具有显著的促进作用(Eldridge et al, 1994; Belnap et al, 2003)。因此,生物土壤结皮在荒漠生态系统恢复中的作用不容忽视(李新荣, 张元明等, 2009),其存在和发展对维护荒漠生态系统健康具有重要的意义。Li等(2004, 2010)论述了通过隐花植物(藓类、地衣等)恢复荒漠生态系统的可行性。与此同时,能否将生物土壤结皮作为材料进行流沙固定,来实现沙化土地的恢复受到了广泛的关注。在自然条件下,生物土壤结皮形成到达稳定阶段需要较长的时间(20~50年甚至更长),如何通过人工方法缩短其形成周期,也是研究的热点和未来推广中的挑战(李新荣, 2012)。

#### 4.6 恢复生态系统的模型预测及模拟

尽管对退化或恢复可以通过许多生态系统特

征(如指示种)的指示作用,以及原生或稳定的系统比较可以达到判别和预测的目的,但对模型的理论研究和实践验证也很重要,能预测未来生态恢复的效果和发展趋势,并起到一定的指导作用,例如相关的机理模型可以预测人工植被的稳定性和演替趋势。目前有关模型的研究主要集中在生态效应评价、资源的承载力评价、生态恢复的可持续发展预测、生态恢复的效益评价等方面。而对恢复生态系统中各组分变化(如预测植被恢复过程中植被、土壤、动物群落动态变化等)的模型预测,干扰对恢复生态系统发展方向模型预测(如火烧干扰对森林生态系统演替进程的影响)等方面的研究较少。此外,国内目前采用的模型大多数是国外开发的,由于中国生态环境的特殊性,其模型预测能力可能存在差异,因此我们应该从各生态系统特征出发,研究适合中国的生态模型。

## 参考文献

- 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 等. 2008. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究: 兼谈塔里木河生态需水量问题. 地球科学进展, 23(7): 2-8. [Chen Y N, Hao X M, Li W H, et al. 2008. An analysis of the ecological security and ecological water requirements in the inland river of arid region. *Advances in Earth Science*, 23(7): 2-8.]
- 慈龙俊, 杨晓辉, 张新时. 2007. 防治荒漠化的"三圈"生态—生产范式机理及其功能. 生态学报, 27(4): 1450-1460. [Ci L J, Yang X H, Zhang X S. 2007. The mechanism and function of "3-Circles": an eco-productive paradigm for desertification combating in China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(4): 1450-1460.]
- 傅伯杰. 2010. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 29(3): 383-395. [Fu B J. 2010. Trends and priority areas in ecosystem research of China. *Geographical Research*, 29(3): 383-395.]
- 李新荣. 2012. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究. 北京: 高等教育出版社. [Li X R. 2012. *Eco-hydrology of biological soil crusts in desert regions of China*. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 李新荣, 王涛. 2004. 沙地生态系统研究//李文华, 赵景柱. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 625-649. [Li X R, Wang T. 2004. Sandland ecosystem research//Li W H, Zhao J Z. *Progresses and perspectives of ecological research in China*. Beijing, China: Meteorological Press: 625-649.]
- 李新荣, 张元明, 赵允格. 2009. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. 地球科学进展, 24(1): 11-24. [Li X R, Zhang Y M, Zhao Y G. 2009. A study of biological soil crusts: recent development, trend and prospect. *Advances in Earth Science*, 24(1): 11-24.]
- 李新荣, 张志山, 王新平, 等. 2009. 干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展. 中国沙漠, 29(5): 845-852. [Li X R, Zhang Z S, Wang X P, et al. 2009. The eco-hydrology of the soil vegetation system restoration in arid zones: a review. *Journal of Desert Research*, 29(5): 845-852.]
- 孙鸿烈, 张荣祖. 2004. 中国生态环境建设地带性原理与实践. 北京: 科学出版社. [Sun H L, Zhang R Z. 2004. *Zhongguo shengtai huanjing jianshe didaixing yuanli yu shijian*. Beijing, China: Science Press.]
- 孙书存, 包维楷. 2005. 恢复生态学. 北京: 化学工业出版社. [Sun S C, Bao W K. 2005. *Restoration ecology*. Beijing, China: Chemical Industry Press.]
- 王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 2010. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 21(9): 2441-2448. [Wang Y, Wei W, Yang X Z, et al. 2010. Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: research advance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(9): 2441-2448.]
- 张景光, 张志山, 王新平, 等. 2005. 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, 25(2): 202-206. [Zhang J G, Zhang Z S, Wang X P, et al. 2005. Reproductive allocation of annual plant *Eragrostis poaeoides* in planted area for sand fixation in Shapotou region. *Journal of Desert Research*, 25(2): 202-206.]
- 张新时. 1994. 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, 18(1): 1-16. [Zhang X S. 1994. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland. *Acta Phytocologica Sinica*, 18(1): 1-16.]
- 张新时. 2010. 关于生态重建和生态恢复的思辨及其科学涵义与发展途径. 植物生态学报, 34(1): 112-118. [Zhang X S. 2010. An intellectual enquiring about ecological restoration and recovery, their scientific implication and approach. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(1): 112-118.]
- 张宇博, 杨海军, 王德利, 等. 2008. 受损河岸生态修复工程的土壤生物学评价. 应用生态学报, 19(6): 1374-1380. [Zhang Y B, Yang H J, Wang D L, et al. 2008. Soil biological evaluation on ecological remedy of damaged riparian. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(6): 1374-1380.]
- 朱震达, 赵兴梁, 凌裕泉, 等. 1998. 治沙工程学. 北京: 中国环境科学出版社. [Zhu Z D, Zhao X L, Ling Y Q, et al. 1998. *Zhisha gongchengxue*. Beijing, China: China Environmental Science Press.]
- Belnap J, Budel B, Lange O L. 2003. Biological soil crusts: structure, function, and management. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Callaham M A, Rhoades C C, Heneghan L A. 2008. A striking



- profile: soil ecological knowledge in restoration management and science. *Restoration Ecology*, 16(4): 604-607.
- Chen Y W, Li X R. 2012. Spatio-temporal distribution of nests and influence of ant (*formica cunicularia* lat.) activity on soil property and seed bank after revegetation in the Tengger Desert. *Arid Land Research and Management*, 26(4): 365-378.
- Coleman D C, Crossley D A, Hendrix Jr P F. 2004. *Fundamentals of soil ecology*. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277(5325): 515-522.
- Dodd M B, Lauenroth W K, Burke I C, et al. 2002. Association between vegetation patterns and soil texture in the shortgrass steppe. *Plant Ecology*, 158: 127-137.
- Eldridge D J, Greene R S B. 1994. Microbiotic soil crusts: a view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 389-415.
- Fonteyn P J, Mahall B E. 1981. An experimental analysis of structure in a desert plant community. *Journal of Ecology*, 69: 883-896.
- Frouz J, Elhottová D, Pižl V, et al. 2007. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: a laboratory study. *Applied Soil Ecology*, 37(1-2): 72-80.
- Hemerik L, Brussaard L. 2002. Diversity of soil macro-invertebrates in grasslands under restoration succession. *European Journal of Soil Biology*, 38(2): 145-150.
- Hickey M, King C. 2001. "Xeromorphic", the Cambridge illustrated glossary of botanical terms. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hobbs R J, Harris J A. 2001. Restoration ecology repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*, 9(2): 239-246.
- Jia J H, Zhao W Z, Li S B. 2012. Regional evapotranspiration rate of oasis and surrounding desert. *Hydrological Processes*, 27(24): 3409-3414.
- Li X R. 2005. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration. *Science China: Earth Sciences*, 48(11): 2020-2031.
- Li X R, Gao Y H, Su J Q, et al. 2014. Ants mediate soil water in arid desert ecosystems: mitigating rainfall interception induced by biological soil crusts? *Applied Soil Ecology*, 78: 57-64.
- Li X R, He M Z, Duan Z H, et al. 2007. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, Northern China. *Geomorphology*, 88(3-4): 254-265.
- Li X R, Kong D S, Tan H J, et al. 2007. Changes in soil and in vegetation following stabilisation of dune in southeastern fringe of the Tengger Desert, China. *Plant and Soil*, 300 (1-2): 221-231.
- Li X R, Tan H J, He M Z, et al. 2009. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions. *Science China: Earth Sciences*, 52(5): 669-680.
- Li X R, Tian F, Jia R L, et al. 2010. Do biological soil crusts determine vegetation changes in sandy deserts? implications for managing artificial vegetation. *Hydrological Processes*, 24(25): 3621-3630.
- Li X R, Wang X P, Li T, et al. 2002. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China. *Biology and Fertility of Soils*, 35(3): 147-154.
- Li X R, Xiao H L, He M Z, et al. 2006. Sand barriers of straw checkerboard for habitat restoration in extremely arid desert region of China. *Ecological Engineering*, 28: 149-157.
- Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. 2004. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, Northern China. *Restoration Ecology*, 12(3): 376-390.
- Li X R, Zhang Z S, Huang L, et al. 2013. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China. *Chinese Science Bulletin*, 58(13): 1-14.
- Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. 2014. 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. *Science China: Life Science*, 57(5): 539-548.
- Liu B, Zhao W Z, Chang X X, et al. 2010. Water requirements and stability of oasis ecosystem in arid region, China. *Environmental Earth Sciences*, 59(6): 1235-1244.
- Noy-Meir I. 1985. Desert ecosystem structure and function// Evenari M, Noy-Meir I, Goodall D W. *Hot deserts and arid shrublands*. Amsterdam, Nederland: Elsevier.
- Oliver M J, Cushman J C, Koster K L. 2010. Dehydration tolerance in plants. *Methods in Molecular Biology*, 639: 3-24.
- Pan Y X, Wang X P, Jia R L, et al. 2008. Spatial variability of surface soil moisture content in a revegetated desert area in Shapotou, Northern China. *Journal Arid Environments*, 72(9): 1675-1683.
- Pareek A, Sopory S K, Bohnert H J, et al. 2010. Abiotic stress adaptation in plants: physiological, molecular and genomic foundation. Dordrecht, Nederland: Springer.
- Roberts L, Stone R, Sugden A. 2009. The rise of restoration ecology. *Science*, 325(5940): 555.
- Sala O E, Lauenroth W K, Golluscio R A. 1997. Plant func-



- tional types in temperate semiarid regions//Smith T M, Shugart H H, Woodward F I. Plant functional types. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 217-233.
- Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 77: 364-374.
- Scott P. 2000. Resurrection plants and the secrets of eternal leaf. *Annals of Botany*, 85(2): 159-166.
- Scullion J, Malik A. 2000. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(1): 119-126.
- Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. 2007. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi Corridor, Northwest China. *Ecological Engineering*, 29(2): 117-124.
- Tewksbury J J, Lloyd J D. 2001. Positive interactions under nurse-plants: spatial scale, stress gradients and benefactor size. *Oecologia*, 127(3): 425-434.
- Walter H. 1979. *Vegetation of the earth: second edition*. New York, NY: Springer-Verlag.
- Ward S J E, Midgley G F, Jones M H, et al. 1999. Response of wild C4 and C3 grass (poaceae) species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. *Global Change Biology*, 5(6): 723-741.
- Wang X P, Wang Z N, Berndtsson R, et al. 2011. Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment. *Hydrology and Earth System Science*, 15: 561-567.
- West N E. 1990. Structure and function of microphytic soil-crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 20: 179-223.
- Xiao D. 1994. Ecologic environment of engineering of shelter-belt network in North, Northwest and Northeast China. *Science and Technology Review*, 8: 38-41.
- Zhang J G, Li X R, Wang X P, et al. 2004. Ecological adaptation strategies of annual plants in artificial vegetation-stabilized sand dune in Shapotou region. *Science China: Earth Sciences*, 47(1): 50-60.
- Zhang Z S, Li X R, Wang T, et al. 2008. Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Kracsh. in the Tengger Desert (North China). *Arid Land Research and Management*, 22: 195-211.
- Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H, et al. 2008. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: a case study in the Hexi Corridor, Northwest China. *Ecological Engineering*, 33(2): 119-125.
- Zhao W Z, Liu B, Zhang Z H. 2010. Water requirements of maize in the middle Heihe River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 97(2): 215-223.

## Progress and trend of development of restoration ecology research in the arid regions of China

LI Xinrong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yang<sup>1,2</sup>, HUI Rong<sup>1,2</sup>, SU Jieqiong<sup>1,2</sup>, GAO Yanhong<sup>1,2</sup>

(1. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Stress Physiology and Ecology in Cold and Arid Regions of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, the development process and characteristics of restoration ecology research in the arid regions of China were reviewed, and the research frontiers and development trends were analyzed systemically. The study on restoration ecology in arid regions has been promoted by national demands. Revegetation was the main method and approach for ecological recovery and restoration. Future study should focus on vegetation zonal distribution, soil habitat restoration, interaction of arid land ecology and hydrology, plant water relation, biological soil crust, projection based on models and modeling, and so on. The interaction and integration of geography and biology provide a new way of thinking and approach for both theoretical and practical innovations in the development of restoration ecology.

**Key words:** arid desert area; ecological restoration in inland river; soil habitat restoration; blown sand hazards; artificial vegetation reconstruction and restoration; ecohydrological process