

DOI: 10.5846/stxb202203130608

杨新国, 刘春虹, 王磊, 陈林, 王兴, 曲文杰, 宋乃平. 荒漠草原生态恢复与重建: 人工植被推动下水分介导的系统响应、生态阈值与互馈作用. 生态学报, 2023, 43(1): 95-104.

Yang X G, Liu C H, Wang L, Chen L, Wang X, Qu W J, Song N P. Study on ecological restoration and reconstruction of desert steppe: A review. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 95-104.

荒漠草原生态恢复与重建: 人工植被推动下水分介导的系统响应、生态阈值与互馈作用

杨新国^{1,2,3}, 刘春虹^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 王兴^{1,2,3}, 曲文杰^{1,2,3}, 宋乃平^{1,2,3,*}

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

摘要: 荒漠草原(生态区)横贯我国西北地区东部, 生态地位十分重要。近二十年来, 通过封育禁牧、退耕还林(草), 植被覆盖显著改善, 但是生态系统质量和稳定性依然不高。由于长期将荒漠草原单纯视作草原的一部分, 对其生态系统过渡性、脆弱性和复杂性本质特征认识不足, 造成了荒漠草原生态学研究与区域生态建设实践之间不同程度的脱节。在分析荒漠草原生态区未来在我国生态安全格局中突出的但是被一定程度上忽视的地位的基础上, 进一步归纳了荒漠草原生态系统的一般特征, 指出了生态恢复与重建研究中存在的主要问题。进而以人工植被引入荒漠草原生态工程为案例, 分析了人工植被驱动荒漠草原生态恢复与重建的过程与机制, 归纳了“植被-水文-土壤”互馈作用驱动生态系统层级响应模式, 并展望了今后的发展趋势与研究方向。

关键词: 荒漠草原; 生态恢复与重建; 人工植被; 生态互馈作用; 生态阈值

Study on ecological restoration and reconstruction of desert steppe: A review

YANG Xinguo^{1,2,3}, LIU Chunhong^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}, CHEN Lin^{1,2,3}, WANG Xing^{1,2,3}, QU Wenjie^{1,2,3}, SONG Naiping^{1,2,3,*}

1 Cultivation Base of State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Desert steppe (ecological region), traversing the eastern part of Northwest China, has important ecological significance, and is very fragile. In the recent two decades, the vegetation coverage has been improved significantly, but most of the grassland have shown various degrees of degeneration. For a long time, the desert steppe has been regarded as a part of grassland, and its transitional nature has not been fully understood. As a result, the ecological research of desert steppe has lagged far behind the practice of regionally ecological construction. Therefore, this paper further emphasizes the prominent position of desert steppe in the Chinese ecological security pattern in the future, which has been neglected for a long period, and then summarizes the general ecosystem characteristics of desert steppe to point out the main problems in the research of ecological restoration and reconstruction. Finally, the process and mechanism of artificial vegetation driving ecological

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060313); 宁夏重点研发课题项目(2019BFG02022, 2021BEG03008)

收稿日期: 2022-03-13; **采用日期:** 2022-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songnp@163.com

restoration and reconstruction of desert steppe are analyzed, and the future research direction and tasks are proposed.

Key Words: desert steppe; ecological restoration and reconstruction; artificial vegetation; ecological interaction; ecological threshold

荒漠草原是草原向荒漠的过渡类型,也是最干旱的一种草原类型。荒漠草原生态区是中国生态地理区划中西北干旱大区的一个二级单位,横贯我国西北地区东部,是荒漠与草原的过渡带,荒漠草原主体分布其中,具有极其重要的生态地位。荒漠草原生态恢复与重建研究始于三北防护林工程,兴于 2000 年前后国家退耕还林(草)、封育禁牧工程的持续大规模实施,这是国内与国外荒漠草原恢复生态学研究背景的显著不同。陈林等^[1]基于文献计量方法剖析了中国荒漠草原研究的发展态势与热点领域:2000 年后有关荒漠草原发文量大幅提高,但是整体发文质量以及交叉合作研究依然薄弱;研究热点集中在人类活动和气候变化影响下荒漠草原生态系统响应、植被生产力形成及其影响因素等方面;但是针对荒漠草原过渡性、脆弱性、复杂性等核心问题形成的具有区域特色的代表性成果依然不多。

人工植被驱动生态恢复与重建的过程机制是荒漠草原研究的重要方向之一,主要集中在人工植被诱导的水文效应与功能权衡、土壤恢复与结皮发育、灌草关系与生物多样性维持等方面^[2-7]。由于对荒漠草原的定义和恢复重建理念的不同,国外有关荒漠草原人工植被研究文献并不多见;国内最早从人工植被介入的水土保持、荒漠化防治开始,开展了大量的基础性和应用性研究工作,近年来逐步聚焦于多尺度的植被-水文关系与人工植被稳定性阈值等方面的研究,其中以黄土高原区和干旱荒漠区最具代表性^[8-9]。荒漠草原处于干旱与半干旱的过渡区,生态过程的交织、生态格局的交错、生态系统脆弱性基础上叠加的人工干预后果的不确定性是其显著特征,导致人工植被引入对荒漠草原生态系统的作用,既具有旱区的一般性,也更多体现出不同于黄土区和荒漠区的特殊性和复杂性。

本文在分析归纳荒漠草原生态区的重要地位和一般特征基础上,以人工柠条引入退化荒漠草原为案例,总结了区域生态恢复与重建的一般规律和特殊机制,并提出了今后主要的几个研究领域与方向。

1 荒漠草原生态区的地位

全球荒漠-草原过渡带多以带状分布在干旱半干旱地区的生态敏感区,具有地理格局上天然的生态屏障特征^[10]。在中国,荒漠-草原过渡带大体与“内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区”的地理分布范围重合,荒漠草原主体分布其中(图 1;中科院数据云 <http://www.csdb.cn/>)。荒漠草原生态区自西南向东北,横贯青藏高原东北缘、黄土高原西北缘、鄂尔多斯台地西部,深入内蒙古高原中部。贺兰山、阴山分别呈南北和东西走向,构成区内主要的分水岭和地理单元分割界限。区内生境类型多样,以草地为背景,沙地间或分布;南部有毛乌素沙地的间断侵入,中部集中分布有库布齐沙漠,北部有浑善达克沙地;草地,由于气候变化和人类活动干扰,存在不同程度的沙化退化等问题。

荒漠草原生态区作为荒漠和草原之间的过渡性生态地理单元,既是遏制风沙东扩的天然屏障,也是保卫草原畜牧业和农牧交错带的生态防线。河套灌区也整



图 1 中国荒漠草原生态区的地理分布范围

Fig.1 Geographical distribution of desert grassland ecological areas in China

II02 表示生态地理分区编号

体包含在荒漠草原生态区内,是西北农业的精华地带,黄河流域上中游生态保护与高质量发展的重要载体。荒漠草原生态区从西南到东北,带状贯穿了北方防沙带和川滇-黄土高原生态屏障,不但决定了以上两个功能单元西北部分的地理基础,而且事实上构成了我国西北地区东部一条天然的生态安全屏障。

荒漠草原生态区也是黄河流域西北缘保护与发展矛盾集中的特殊区域,地理背景与现实发展反差巨大,容易出现生态恢复背离地理背景,开发强度超越地理背景的现象^[11-13]。荒漠草原生态区尽管初步扭转了2000年前后土地沙漠化持续扩大的趋势^[14],但是生态退化的风险依然居高不下^[15]。防风固沙、土壤保持、生物多样性保护依然是荒漠草原生态区的主体生态功能^[16],宜整体纳入国家长期生态安全战略规划,并加强同《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》的衔接。

傅伯杰^[17]结合国家“十四五”生态保护与建设规划,提出应建设几条连接生态屏障和生态带的南北廊道,形成“屏障-带-廊道”网络化的国家生态安全格局。鉴于其重要而独特的地位,荒漠草原生态区是进一步细化未来北方生态安全格局的重要一环:首先,荒漠草原生态区天然衔接了北方防沙带、黄土高原生态屏障和青藏高原生态屏障三大功能区,可视为“三屏四带”北方生态脆弱区一体化保护的天然纽带;其次,黄土高原生态建设重点未来西迁北移趋势明显,荒漠草原生态区大部处于黄土高原西部和北部,是黄土高原生态屏障功能的战略接续与梯次强化;另外,荒漠草原还可以承担起北方防沙带治理空间置换的功能,治理重点从前线治沙转向后方防沙,主场后撤进入荒漠草原生态区,搭建一个西南-东北向的完整防沙带。

2 荒漠草原生态系统恢复与重建的一般特征

相较于毗邻的典型荒漠和典型草原,生态过程的交织、生态格局的交错、生态系统脆弱性基础上叠加的人工干预后果的不确定性一起构成了荒漠草原生态系统及其恢复重建过程的一般特征:

(1)生态退化与恢复过程交织并存:荒漠草原生态恢复与重建历经几十年,特别是自2000年以来,通过封育禁牧、退耕还林草,植被覆盖整体上显著改善,但是总体生态环境依然十分脆弱^[2, 16, 18]。特别是在长期人工干预生态恢复下,植被数量提升与植被质量下降、土壤养分恢复与土壤水分恶化等往往相伴而生,局域生态退化与恢复过程并存^[3, 19]。而在区域尺度上受自然地理格局与环境异质性的影响,生态恢复起点迥异、进程不一,普遍存在着生态水文阈值的潜在约束,决定着植被的水量平衡和系统的稳定性^[8, 20-23],也影响着生态恢复抑或退化进程的走向。

(2)生态格局破碎化与生态功能碎片化:区域梁地和滩地交错分布地貌上沙地的间或侵入^[24-25],决定了荒漠草原整体生态格局破碎化的基础。在不同空间尺度上,体现出沙地和草地的交错、荒漠与湿地(草甸)的并存、土质和沙质斑块的镶嵌,以及相应存在的格局破碎化、功能碎片化等结构性问题^[4, 26-28]。无论在空间管控还是功能恢复方面,生态系统管理都面临着极高的难度。

(3)人工干预后果的双重性及其趋势的不确定性:由于荒漠草原自然恢复困难和结果的不确定性,实践中多将人工干预作为生态恢复与重建的主要技术路径,其中尤以人工植被的引入最为典型,其所带来的复杂生态效应已经集中显现:在显著提高植被覆盖和固定土壤的同时,也出现了诸如水文过程的改变、生态功能权衡,以及人工植被稳定性等方面的次生问题^[3, 7, 9, 22]。加之,荒漠草原生态系统易受气候变化的影响^[29-30],生态恢复与重建的不确定性很高。

3 人工植被驱动荒漠草原生态恢复与重建研究典型案例

人工植被引入是荒漠草原生态恢复与重建中具有区域普遍性的一种工程措施。以宁夏中东部荒漠草原区为例,人工柠条(*Caragana intermedia*)从无到有,2019年已经发展到了近24万公顷(图2),在区域生态恢复与重建中发挥了关键性的作用,同时柠条引入也深刻改变着这一区域的植被格局与生态过程。

3.1 种群层面——土壤旱化与人工柠条的反馈适应

不合理的人工植被建植诱发土壤干层形成是旱区存在的一个普遍性问题^[31]。局域尺度长期监测结果表

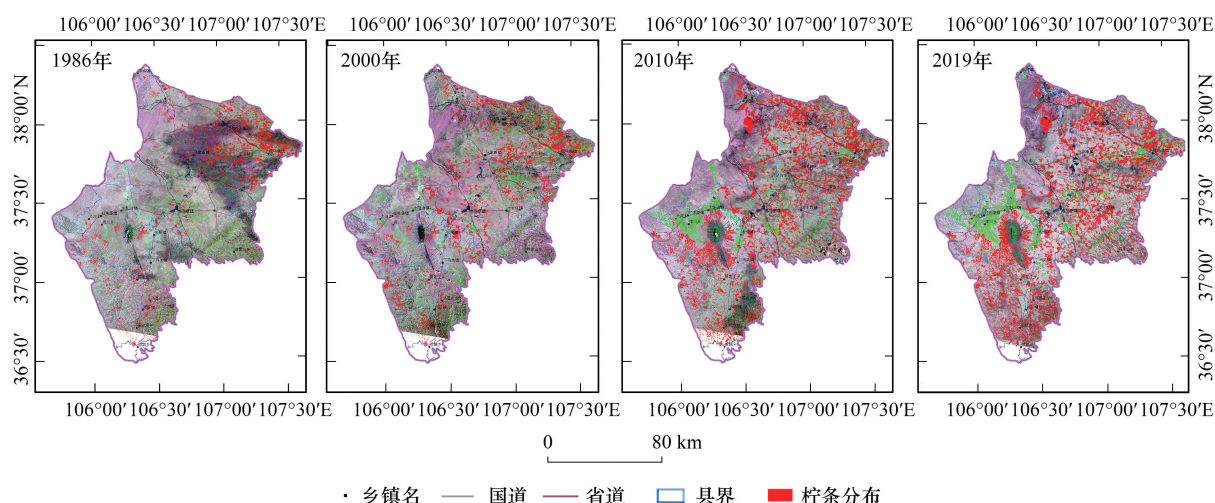
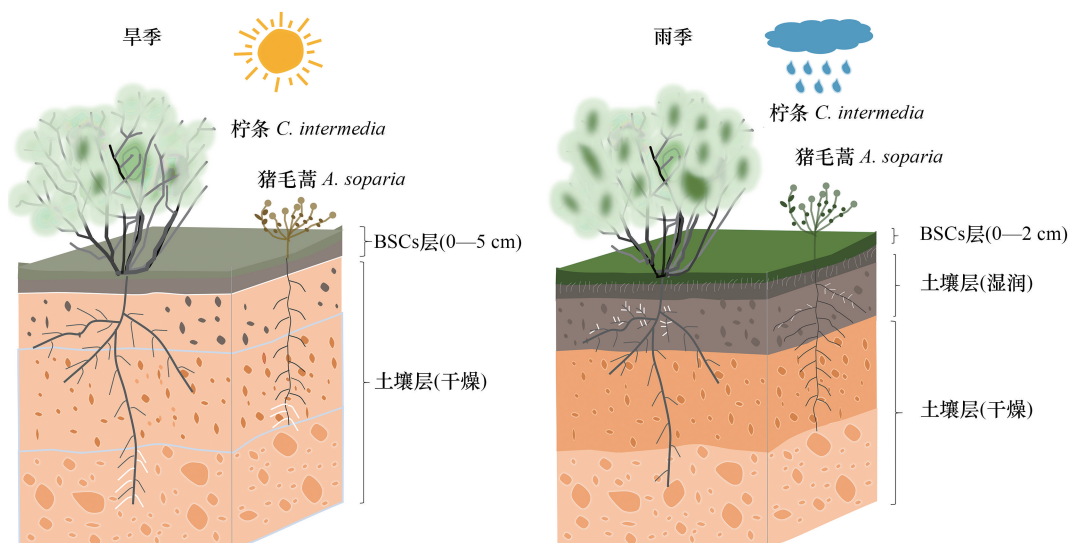


图2 人工柠条引入荒漠草原的过程

Fig.2 Introduction process of Artificial *Caragana korshinskii* into desert grassland

明,柠条长期引入荒漠草原显著引发了土壤干旱,且程度在持续加重,150 cm(中龄林)和100 cm(老龄林)以下已经出现了稳定的土壤干层;且随林龄的增长,主要土壤水分利用层逐步收窄并上移,柠条对当季降水的依赖加剧^[32-33]。土壤旱化的同时,也诱发了柠条种群自身的衰败^[34-35]。

极度土壤干旱下,基于稳定同位素技术和 U30 土壤水分自动监测技术研究发现,生物土壤结皮(BSCs)通过对旱季和雨季降水在土壤表层和下层分配关系的调节,诱导柠条根系逆重力向表层土壤生长,获取水分从而维持了自身的生存^[33, 36-37]。与荒漠生态系统人工植被与 BSCs 关系研究^[9, 38-39]不同的是,极端土壤干旱条件下,BSCs 介导下对降水转化的当季土壤水分的获取是荒漠草原人工柠条维持自身稳定性的关键过程,这种稳定性机制也突破了旱区灌草“上下分层模型(up-down two-layer model)”共存模式^[40-41](图3)。

图3 极端土壤干旱条件下生物土壤结皮(BSCs)诱导的灌草共存模式^[33, 37]Fig.3 The adaptation mechanism of shrub and grass crust (BSCs) under extreme drought conditions^[33, 37]

冠层水文过程也是旱生灌木稳定性维持的关键过程之一。研究表明^[7, 42],降水在柠条冠层的转化主要发生在穿透雨和截留水之间,茎流发生体现出分降水量区间的低值跃变响应特征,茎流启动最低降水量阈值则表现出区间性分布的现象,在研究区(宁夏中东部荒漠草原)这个阈值区间为0—2 mm。研究从系统发生

关系上对旱生灌木茎流“低而不稳”现象做了新的理论解释,并拓展了茎流启动最低降水量阈值的概念内涵。

荒漠草原人工柠条如何维持其稳定性并最终能稳定在何种状态,既是一个重要的理论问题,也是一个需要科学回答的实践问题。相对与荒漠生态系统中 50—60 年内人工灌木可达到的 10% 稳定维持密度^[43],结合人工柠条稳定性维持的特殊生态水文机制,荒漠草原人工柠条的稳定密度可能更高一些,同时达到这个稳定密度的时间也更为漫长。

3.2 群落层面——二元灌草植被系统的形成与僵化

化感作用广泛存在于自然界中,是种间关系研究的一个重要领域。研究明确了柠条与荒漠草原常见物种间具有的化感作用,分离鉴定出了主要化感物质^[5];柠条化感作用具有很强的物种和生活史的选择性,柠条各器官中以根系的化感物质最为丰富,土壤中鉴定出的化感物质与植物器官在类别上基本一致,反映了两者的产生与释放关系。进而,以柠条和紫花苜蓿为例,研究了化感和资源竞争在灌草关系形成中的相对贡献^[6];柠条和紫花苜蓿间的资源竞争与化感作用同时存在,低土壤水分条件下,资源竞争占主导;高水分条件下,化感抑制了植物生长,资源竞争强度降低。柠条与紫花苜蓿存在显著的单向邻域效应,紫花苜蓿对柠条的化感抑制效应更强,是其在低水分环境下资源竞争的利器。

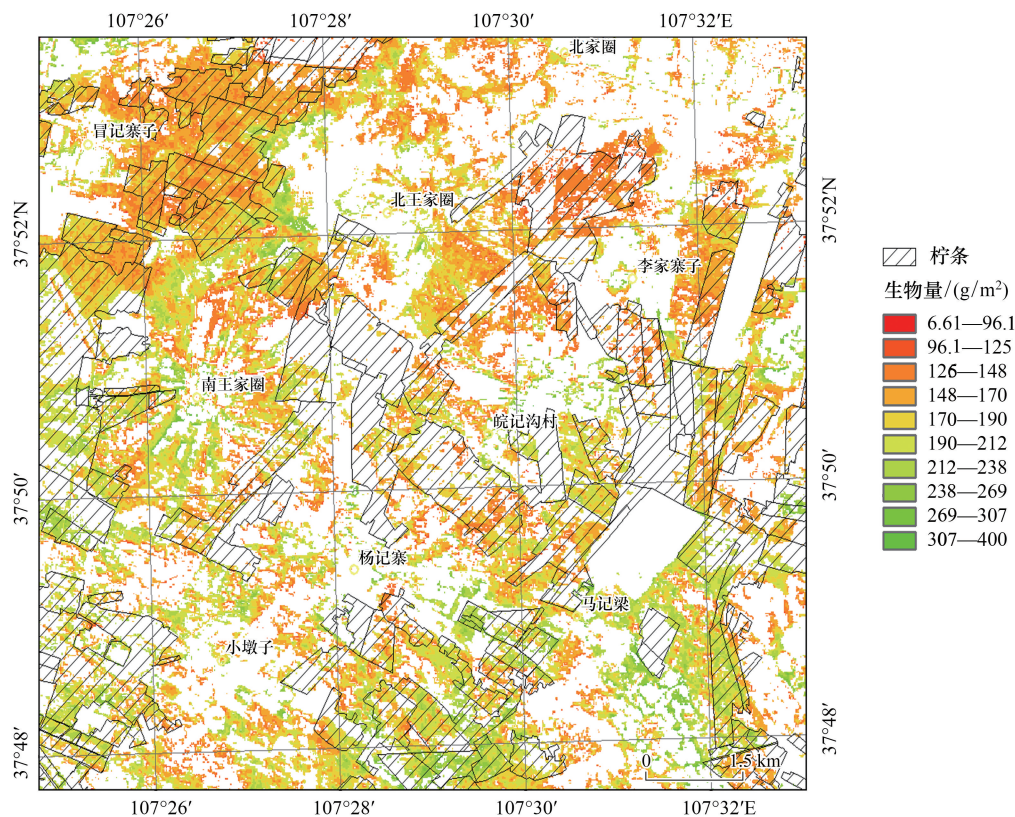


图4 荒漠草原“柠条-猪毛蒿”灌草二元系统^[44]

Fig.4 Desert steppe "Caragana-Artemisia" shrub-grass binary system^[44]

“柠条-猪毛蒿”灌草二元系统是柠条长期引入荒漠草原退化草地后形成的一种具有高度适应性的结构单一、功能低下的植被景观(图4),BSCs在其中发挥了关键性作用。如图3所示,BSCs活性及其水文特性存在季节性的明显转换:旱季,BSCs处于休眠状态,持水力强而渗水性差;雨季,BSCs复活生长,渗水性提高而持水力下降。由此,以BSCs为介质,显著改变了降水在土壤中的再分配及其相对有效性,进而诱导了上层土壤中柠条根系始于旱季末的逆重力生长,以及猪毛蒿根系旱季快速下探和雨季浅表水平扩张生长过程,实现了灌草水分来源的精细分割,推动了“柠条-猪毛蒿”灌草二元系统的形成。综合来看,这种二元系统的形成机制

可总结为:第一,对策互补^[44-45]。柠条作为多年生深根性灌木,抵抗力强;猪毛蒿作为1年生草本,典型的广域分布机会物种,弹性适应性强;两者的生态对策高度互补,对荒漠草原生境与气候具有很强的整体适应性。第二,竞争共存^[33, 37]。柠条和猪毛蒿既存在资源竞争,又存在生活史决定的共存基础。早期柠条与猪毛蒿水分来源差异显著,后期柠条与猪毛蒿对浅层土壤水分的竞争加剧,但是由于生活史的显著差异,两者水分利用存在时空精细再平衡机制。第三,协同排他^[3, 32, 45-46]。柠条长期引入造成土壤水分环境的高度旱化,限制了中旱生植物的进入,但是柠条对猪毛蒿具有显著的化感促进作用;猪毛蒿对荒漠草原主要建群种具有很强的化感抑制作用;猪毛蒿具有的爆发性种群生长对策,进一步挤占了其他草本植物的生存空间。

3.3 系统层面——土壤与植被恢复进程的协同与解耦

土壤与植被的相互作用决定了局域尺度生态系统恢复的进程与格局^[4, 28, 47]。在空间格局上,柠条土壤保持作用具有明显的尺度依赖效应^[48-52];灌丛尺度上,柠条引入推动了灌丛沙堆与沃岛效应的形成,其中中间锦鸡儿以拦截和沉积风沙为主,而柠条锦鸡儿则以风沙推移堆积为主;斑块尺度上,土壤质地随柠条生长年限的增加表现出“自上而下”和“由内到外”的渐进式恢复,并与碳氮资源存在协同演进关系;景观尺度上,风蚀作用驱动的营养损失以全氮为主,景观各向异性显著,保持柠条完整性和地表覆盖有助于控制土壤风蚀量。在恢复进程上,柠条引入后土壤质量表现出缓慢但是正向的持续恢复趋势,林间植被数量特征则存在先升后降的转折性变化,两者在恢复进程上表现出一种明显的解耦现象;土壤正向演替只是推动了物种的更替,后期林间植物群落存在向天然草地的演替趋势^[3, 53-54]。

3.4 区域层面——生态系统服务功能的分化与权衡

生态过程一般具有普遍的尺度依赖性,不同尺度上驱动因子也不尽相同。区域尺度的研究表明,人工柠条林与相邻天然草地之间土壤水分含量、分布,物种构成与多样性水平在区域尺度上并无显著的统计性差异^[55]。同时,土壤质地的分布变化及其与柠条引入的关系表现出了相似的规律,但是以土壤黏粒富集率为指征的柠条土壤保持作用在灌丛尺度和斑块尺度分别表现出与本底土壤沙化程度的正向和负向回归关系,说明柠条引入只是显著改变了小尺度土壤黏粒物质的空间再分配格局^[56]。柠条大规模引入研究区近二十年来,直接或间接地显著遏制了土地严重沙化过程,但是对区域范围内土壤质量的恢复、水源涵养、生物多样性等重要生态系统服务功能的作用尚未充分体现,尽管确实显著影响了局域尺度上植被-水文-土壤的空间分布关系与互馈作用。这与 Zhang 等^[57]相邻区域样带调查研究结果基本一致。土壤、气候、水文等环境要素的区域性空间差异依然是决定植被分布、植被-水文关系及其生态服务功能实现的首要限制因素^[58-61]。

干旱地区,土壤水分的空间分布深刻影响着区域植物群落结构、分布以及生态功能^[59-60]。研究发现^[22], 20—60 cm 土层土壤含水量的高低决定了土壤水分与生物多样性的关系(简称水-生关系)的类型:当水分含量高于 6%—8% 时,水-生关系表现为协同,低于 6%—8% 表现为权衡;同时,这种分布关系与覆被类型、坡向等因素无关。荒漠草原区域尺度(200—300 mm 降水范围内)发现的这一水-生关系变化的阈值(20—60 cm 土层 6%—8% 土壤含水量),与黄土高原区域尺度(250—550 mm 降水范围内)阈值(370 mm 降水量)所对应的 0—100 cm 平均土壤含水量十分接近^[62]。20—60 cm 是旱区土壤承接当季降水的有效空间,6%—8% 含水量处于中等偏下但是显著高于萎蔫含水量的有效水分区间,相对于降水的大尺度生态系统功能格局解释能力的不足^[63-64],作为一种生物学有效的“土壤水库^[65]”,20—60 cm 土层 6%—8% 土壤含水量在黄土高原(200—550 mm)植被-水文分布关系中可能更具一般性的指示意义。

3.5 模式总结——人工植被推动下“植被-水文-土壤”互馈作用驱动生态系统层级响应

旱区植被、土壤、水文存在多尺度的耦合作用,是驱动生态系统过程与格局的一般机制^[66]。综合不同尺度的研究,本文归纳提出了人工植被推动下“植被-水文-土壤”互馈作用驱动荒漠草原生态系统层级响应的概念模式图(图 5)。

(1) 生态系统的层级响应及其驱动的尺度依赖性:柠条引入荒漠草原后生态系统响应的复杂性体现在多过程、多要素的交织与层级叠加。局域尺度上,柠条引入并启动生态系统恢复进程的同时,逐步加剧了土壤旱

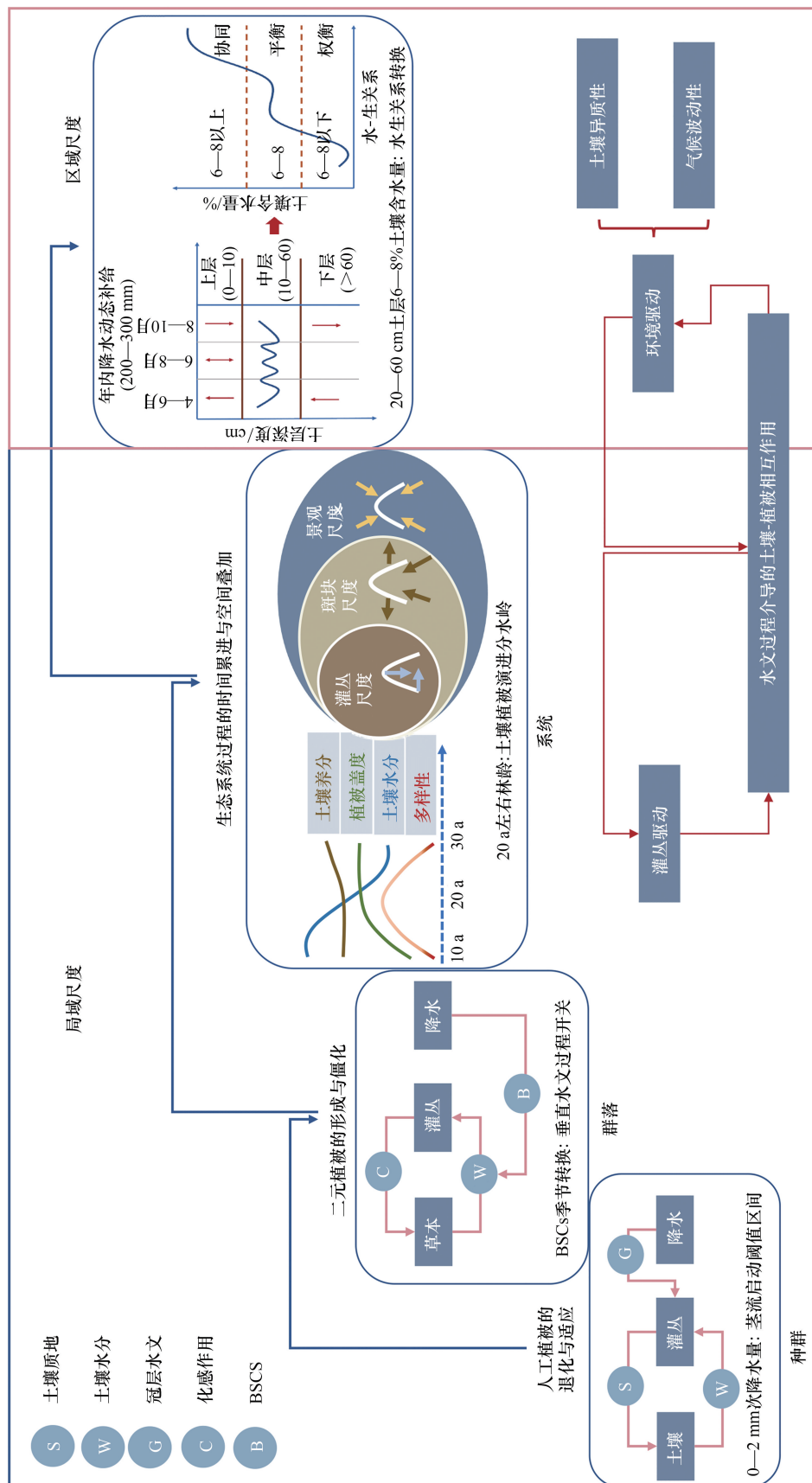


图5 人工植被(柠条)驱动荒漠草原生态系统响应的一般模式
Fig.5 General model of desert grassland ecosystem response driven by artificial vegetation (*Caragana intermedia*)

化的程度,反馈推动了柠条自身的衰败,同时也诱发了其对土壤水文环境的生物学弹性适应。由此,柠条种群层面的反应进一步触发了群落和系统层面的连锁反应:在 BSCs 参与下,灌草间围绕表层土壤水分资源的争夺,通过时间和空间生态位的精细分割,形成了结构高度单一的二元化灌草群落。同时,柠条驱动下生态系统土壤养分、土壤水分、植被盖度和生物多样性的演替进程表现出了较强的时空异质性,柠条引入 20 年左右土壤-植被相互作用从协同转向解耦。区域尺度上,柠条的驱动作用让位于土壤异质性和气候波动性等环境因子,水-生关系的形成存在显著的土壤水文阈值依赖,且不受植被覆盖类型变化的影响。

(2)“植被-水文-土壤”互馈作用与生态阈值的结构化分布:水文过程介导的土壤-植被相互作用贯穿局域和区域尺度生态系统响应的全过程,并体现出不同的阈值特征:在种群层面,茎流发生维系着柠条自身的稳定性,茎流启动在 0—2 mm 次降水量范围内具有高度的随机性;在群落层面,BSCs 介入后强化了土壤水文过程的浅层化,旱季和雨季 BSCs 活性的转换是启动土壤垂直水文过程的“钥匙”;在系统层面,柠条引入 20 年左右是土壤与植被演进关系的分水岭。区域尺度上,土壤水文条件决定了区域植被的分布与结构:20—60 cm 土层是季节性降水转化并有效蓄存的“土壤水库”,6%—8%含水量则是触发水-生关系跃变的“水位线”。

4 荒漠草原生态恢复与重建研究展望

以宁夏中部荒漠草原区为例,在长期人工干预下,生态系统总体上呈现出三分天下的格局:以柠条-猪毛蒿为代表的二元人工灌草系统、处于不同植被恢复阶段的沙地系统、以及不同程度碎片化存在的原生草地系统。就功能而言,则整体处于一种僵化状态,生物多样性提升、水文环境安全以及生态系统稳定性^[8, 20, 43]等生态恢复与重建的长期目标尚未提上日程。生态系统适应性管理^[67]应作为今后本区域生态恢复与重建的首要原则,持续提升生态系统的质量和稳定性。

以生态系统适应性管理的理论基础为导向,未来荒漠草原生态恢复与重建需要重点开展三个方面的基础研究:第一,推动生态恢复与重建的一般模式研究从局域尺度向景观尺度转变。以沙地、草地、林地和湿地并存的哈巴湖自然保护区为例,小流域内季节性洪水和浅层地下水过程依然可观,这在景观尺度按照水文过程合理配置植被提供了前提^[66, 68]。这种模式也可视作生态草牧业十分之一生产力理论^[16, 69]在荒漠草原的一种变通应用,也就是以水的自然富集在小流域范围内重新安排草-畜的时空关系。第二,加强荒漠草原生态地理学研究,在大尺度上进一步揭示生态系统变化的关键阈值、敏感区域^[70]。其中,旱区植被格局非连续变化的突变理论^[71]、人工植被稳定性的生态水文阈值^[43, 72]、干旱区植被的水分聚集适应理论^[66]是认识区域生态系统稳定性机理、指导大规模生态建设实践的重要理论依据。以生态地理学理论为指导,适应性管理要跳出“把荒漠草原简单视为草原的一部分”的思维定式,更多从荒漠草原的生态属性出发,把生产功能放在一个合适的空间比例和位置上,实现更为集约化的安排。第三,加强地下生态学研究,推动荒漠草原生态系统一般模型的构建。最近发表在《科学》杂志的一篇论文^[73],基于博弈论构建了一种物种间根系相互作用的模型,结合旱区土壤水库模型^[65],为以水-生关系为核心的荒漠草原生态系统一般模型的构建指明了方向。

另外,就生态系统适应性管理的具体措施或途径而言,可以重点从两个方面开展应用性研究工作:第一,从生态建设顶层规划设计入手,打破政出多门和条块分割的管理痼疾,自上而下,引入生态工程学和系统生态学的设计理念,完善旱区流域山水林田湖草沙一体化保护与修复的技术规范,用系统性克服复杂性。第二,从面向管理的生态监测与预警技术入手,引入现代信息技术与大数据分析手段,搭建起流域生态监测网络和数据分析一体化平台,用精准性克服不确定性。

参考文献 (References):

- [1] 陈林,曹萌豪,宋乃平,李学斌,邱开阳,庞丹波.中国荒漠草原的研究态势与热点分析——基于文献计量研究.生态学报,2021,41(24):9990-10000.
- [2] 宋乃平,杜灵通,王磊.盐池县2000—2012年植被变化及其驱动力.生态学报,2015,35(22):7377-7386.
- [3] 杨新国,赵伟,陈林,王磊,宋乃平.荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征.生态环境学报,2015,24(4):590-594.

- [4] Wang X, Song N P, Yang X G, Chen L, Qu W J, Wang L. Inferring community assembly mechanisms from functional and phylogenetic diversity: the relative contribution of environmental filtering decreases along a sand desertification gradient in a desert steppe community. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(7): 2360-2370.
- [5] Chen L, Yang X G, Wang L, Song N P. Allelopathic effects of *Caragana intermedia* on monocot and dicot plant species and identification of allelochemical. *Allelopathy Journal*, 2017, 42(2): 253-264.
- [6] 翟德苹. 荒漠草原柠条—苜蓿人工复合系统种间关系研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [7] Yang X G, Chen L, Wang L, Wang X, Gu J L, Qu W J, Song N P. Dynamic rainfall-partitioning relationships among throughfall, stemflow, and interception loss by *Caragana intermedia*. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 980-989.
- [8] Feng X, Fu B, Piao S, Wang S, Ciais P, Zeng Z, Lü Y, Zeng Y, Li Y, Jiang X, Wu B. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [9] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 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(S1): 397-410.
- [10] Hou J, Du L T, Liu K, Hu Y, Zhu Y G. Characteristics of vegetation activity and its responses to climate change in desert/grassland biome transition zones in the last 30 years based on GIMMS3g. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(3/4): 915-928.
- [11] 赛胜宝. 内蒙古北部荒漠草原带的严重荒漠化及其治理. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(4): 34-39.
- [12] 宋乃平, 张凤荣. 鄂尔多斯农牧交错土地利用格局的演变与机理. *地理学报*, 2007, 62(12): 1299-1308.
- [13] 宋乃平, 卞莹莹, 王磊, 陈林, 杨新国, 王响, 王兴, 曲文杰. 农牧交错带农牧复合系统的可持续机制. *生态学报*, 2020, 40(21): 7931-7940.
- [14] 王涛, 吴薇, 薛嫻, 张伟民, 韩致文, 孙庆伟. 中国北方沙漠化土地时空演变分析. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230-235.
- [15] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. *科学通报*, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [16] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 周楷玲. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675-689.
- [17] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [18] 宋乃平, 汪一鸣, 陈晓芳. 宁夏中部风沙区的环境演变. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(4): 7-12.
- [19] 宋乃平, 杨明秀, 王磊, 王兴, 肖绪培, 曲文杰. 荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2618-2624.
- [20] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [21] Tang Z S, An H, Shangguan Z P. The impact of desertification on carbon and nitrogen storage in the desert steppe ecosystem. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 92-99.
- [22] Wang L, Wang X, Chen L, Song N P, Yang X G. Trade-off between soil moisture and species diversity in semi-arid steppes in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141646.
- [23] 王雅舒, 李小雁, 石芳忠, 张树磊, 吴秀臣. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发. *科学通报*, 2019, 64(S1): 588-599.
- [24] 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): 1-16.
- [25] 慈龙骏, 杨晓晖, 张新时. 防治荒漠化的“三圈”生态-生产范式机理及其功能. *生态学报*, 2007, 27(4): 1450-1460.
- [26] Xie Y Z, Qiu K Y, Xu D M, Shi X F, Qi T Y, Pott R. Spatial heterogeneity of soil and vegetation characteristics and soil-vegetation relationships along an ecotone in Southern Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(7): 1584-1601.
- [27] 宋乃平, 王兴, 陈林, 薛毅, 陈娟, 随金明, 王磊, 杨新国. 荒漠草原“土岛”生境群落物种共存机制. *生物多样性*, 2018, 26(7): 667-677.
- [28] Tang Z S, An H, Zhu G Y, Shangguan Z P. Beta diversity diminishes in a chronosequence of desertification in a desert steppe. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 543-550.
- [29] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 范一大, 周涛, 谢锋. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 254-261.
- [30] Hu Z M, Guo Q, Li S G, Piao S L, Knapp A K, Ciais P, Li X R, Yu G R. Shifts in the dynamics of productivity signal ecosystem state transitions at the biome-scale. *Ecology Letters*, 2018, 21(10): 1457-1466.
- [31] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [32] 刘凯. 荒漠草原人工柠条林土壤水分动态及其对降水脉动的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [33] 赵伟. 荒漠草原人工柠条林灌木植被的水分来源[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [34] 翟德苹, 陈林, 杨明秀, 宋乃平, 杨新国. 荒漠草原不同生长年限中间锦鸡儿灌丛枝系构型特征. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(3): 340-348.
- [35] 于瑞鑫, 王磊, 杨新国, 陈林, 蒋齐, 王兴, 陈娟. 平茬柠条的土壤水分动态及生理特征. *生态学报*, 2019, 39(19): 7249-7257.
- [36] 杨东东, 赵伟, 陈林, 王磊, 宋乃平, 杨新国. 人工柠条林生物土壤结皮地表水文效应的季节转换. *西北植物学报*, 2018, 38(7): 1349-1356.
- [37] 杨东东. 生物土壤结皮的植物与水文效应研究——以荒漠草原猪毛蒿为例[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [38] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 王新平, 张景光. 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, 21(1): 4-11.
- [39] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 11-24.
- [40] Walter H. Ecology of tropical and subtropical vegetation. *Soil Science*, 1976, 121(5): 317.
- [41] Rodríguez M V, Bertiller M B, Bisigato A. Are fine roots of both shrubs and perennial grasses able to occupy the upper soil layer? A case study in the arid Patagonian Monte with non-seasonal precipitation. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 281-288.

- [42] 古君龙. 荒漠草原中间锦鸡儿冠层水文过程研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [43] Li X R, Zhang D H, Zhang F, Zhang P. The eco-hydrological threshold for evaluating the stability of sand-binding vegetation in different climatic zones. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 404-415.
- [44] 周娟. 基于 GF-1/WFV 时间序列的荒漠草原猪毛蒿群落提取及时空特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [45] 陈林, 苏莹, 李月飞, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 邱开阳, 刘波. 荒漠草原异质生境下猪毛蒿种群动态. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2654-2666.
- [46] 徐坤, 陈林, 卞莹莹, 辛佳宁, 杨新国. 猪毛蒿根水浸提液对 4 种冰草种子萌发和幼苗生长的化感作用. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2019, 45(5): 574-584.
- [47] Bai Y X, Zhang Y Q, Michalet R, She W W, Jia X, Qin S G. Responses of different herb life-history groups to a dominant shrub species along a dune stabilization gradient. *Basic and Applied Ecology*, 2019, 38: 1-12.
- [48] 陈娟. 荒漠草原人工柠条林防治土壤风蚀效应研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [49] 潘军, 宋乃平, 吴旭东, 杨新国, 陈林. 荒漠草原人工柠条林对土壤物理稳定性的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 172-176.
- [50] 潘军, 安超平, 吴旭东, 周娟, 米楠, 宋乃平. 荒漠草原 2 种锦鸡儿灌丛化过程中土壤养分分布规律. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 131-136.
- [51] 宋乃平, 吴旭东, 潘军, 曲文杰, 周娟, 安超平. 荒漠草原人工柠条林对土壤质地演进过程的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 703-711.
- [52] 吴旭东, 宋乃平, 潘军. 不同沙地生境下柠条灌丛化对草地土壤有机碳含量及分布的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 115-121.
- [53] 赵伟, 杨明秀, 陈林, 王磊, 宋乃平, 杨新国. 荒漠草原人工柠条林草本层植被的结构与动态. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 723-731.
- [54] 安超平, 王兴, 宋乃平, 周娟, 随金明. 荒漠草原中间锦鸡儿林土壤养分效应对群落组分和多样性的影响. *西北植物学报*, 2016, 36(9): 1872-1881.
- [55] 孟明. 宁夏中部干旱带荒漠草原土壤水分与生物多样性的相关关系[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [56] 曹媛. 柠条引入荒漠草原的土壤保持作用[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [57] Zhang C C, Wang Y Q, Jia X X, Shao M A, An Z S. Impacts of shrub introduction on soil properties and implications for dryland revegetation. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140498.
- [58] Hao L, Sun G, Liu Y Q, Gao Z Q, He J J, Shi T T, Wu B J. Effects of precipitation on grassland ecosystem restoration under grazing exclusion in Inner Mongolia, China. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1657-1673.
- [59] D'Odorico P, Caylor K, Okin G S, Scanlon T M. On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G4): G04010.
- [60] Ruiz-Sinoga J D, Gabarrón Galeote M A, Martínez Murillo J F, García Marín R. Vegetation strategies for soil water consumption along a pluviometric gradient in southern Spain. *CATENA*, 2011, 84(1/2): 12-20.
- [61] Zirbel C R, Grman E, Bassett T, Brudvig L A. Landscape context explains ecosystem multifunctionality in restored grasslands better than plant diversity. *Ecology*, 2019, 100(4): e02634.
- [62] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 杨磊. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1351-1362.
- [63] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291(5503): 481-484.
- [64] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, Xu Z Z. Carbon balance along the North-east China Transect (NECT-IGBP). *Science in China Series C: Life Sciences*, 2002, 45(S1): 18-29.
- [65] Ryel R J, Ivans C Y, Peek M S, Leffler A J. Functional Differences in Soil Water Pools: a New Perspective on Plant Water Use in Water-Limited Ecosystems. *Progress in Botany*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 397-422.
- [66] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [67] 王德利, 王岭. 草地管理概念的新释义. *科学通报*, 2019, 64(11): 1106-1113.
- [68] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 673-681.
- [69] 方精云. 我国草原牧区呼唤新的草业发展模式. *科学通报*, 2016, 61(2): 137-138.
- [70] 史培军, 孙劭, 汪明, 李宁, 王静爱, 金赞赞, 顾孝天, 尹卫霞. 中国气候变化区划(1961—2010 年). *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2294-2306.
- [71] Kéfi S, Eppinga M B, Ruiter P C, Rietkerk M. Bistability and regular spatial patterns in arid ecosystems. *Theoretical Ecology*, 2010, 3(4): 257-269.
- [72] Li X R. Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(11): 2020-2031.
- [73] Cabal C, Martínez-García R, de Castro Aguilar A, Valladares F, Pacala S W. The exploitative segregation of plant roots. *Science*, 2020, 370(6521): 1197-1199.