

干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制

刘 英^{1,2}, 雷少刚³, 李心慧⁴, 王藏姣³, 官传刚⁵

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 中国矿业大学 矿山生态恢复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 4. 河南财经政法大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450000; 5. 安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:生态阈值识别是干旱矿区植被引导型修复中重要技术环节, 其中干旱阈值是诸多关键生态阈值中极为重要一项。不同干旱阈值区间矿区植被结构和功能属性会发生变化, 明晰不同干旱阈值下潜在生态机制对于干预合理程度及引导修复方向的判定至关重要, 现有研究对于引发这些变化的生态机制缺乏系统梳理。在文献调研的基础上构建干旱矿区植被系统对干旱程度的响应概念模型, 将干旱矿区植被系统对干旱度的响应概括为植被衰退阶段、“土壤失调”阶段和“系统崩溃”阶段。植被衰退阶段, 主要表现为植被应对极端缺水环境的光合生理适应方式和特性的改变; “土壤失调”阶段, 主要涉及土壤和植物之间复杂互馈作用, 通过土壤侵蚀途径、灌木入侵途径及生物地球化学途径进行传递; “系统崩溃”阶段, 主要由于植物生理极限触发植物-植物和植物-大气的互馈作用, 导致系统多样性急剧降低。未来可在典型植物选育、研究尺度扩展、干旱诱导的灌木性状发育机制、干旱诱导的生物地球化学循环突变机制、干旱胁迫解除后植物能够自行恢复其生理活动的时间节点、生物结皮产生机制等方面进行深入研究。综述结果为干旱矿区植被引导型修复干旱阈值潜在生态机制理解提供了一个基本框架, 以期为科学判定干预合理程度及引导修复方向提供生态学基础。

关键词: 干旱矿区; 植被修复; 干旱阈值; 恢复力; 矿区环境

中图分类号: TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)06-2550-14

Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in arid mining areas for vegetation guided restoration

LIU Ying^{1,2}, LEI Shaogang³, LI Xinhui⁴, WANG Cangjiao³, GONG Chuangang⁵

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. The Anhui Province Engineering Laboratory of Water and Soil Resources Comprehensive Utilization and Ecological Protection in High Groundwater Mining Area, Huainan 232001, China; 3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. College of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450000, China; 5. School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The identification of ecological threshold is one of the important technical links in the vegetation guided restoration in arid mining areas, and the aridity threshold is a very important one among many key ecological thresholds. There will be sudden changes in the structure and functional attributes of the vegetation system in mining areas in different arid-

收稿日期: 2022-08-08 修回日期: 2022-09-22 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1173

基金项目: 安徽省教育厅重点基金资助项目 (KJ2021A0423); 国家自然科学基金青年资助项目 (52204181); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2013CB227904)

作者简介: 刘 英 (1990—), 男, 安徽安庆人, 讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: liuying340825@aust.edu.cn

引用格式: 刘英, 雷少刚, 李心慧, 等. 干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2550-2563.

LIU Ying, LEI Shaogang, LI Xinhui, et al. Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in arid mining areas for vegetation guided restoration[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(6): 2550-2563.



移动阅读

ity threshold areas. It is very important to clarify the underlying ecological mechanism under different aridity thresholds for the determination of the reasonable degree of intervention and the direction of guiding the restoration. The existing research lacks a systematic review of the ecological mechanism that causes these mutations. A conceptual model of abrupt response of dryland ecosystem to drought is constructed in this paper, which summarizes the response of dryland ecosystem to drought degree as vegetation recession stage, "soil imbalance" stage and system collapse stage. In the declining stage of vegetation, it is mainly manifested in the changes of photosynthetic physiological adaptation mode and characteristics of vegetation in response to extreme water shortage environment. The "soil imbalance" stage mainly involves the complex interaction between soil and plants, which is transmitted through soil erosion, shrub invasion and biogeochemical pathways. In the stage of system collapse, the plant-plant and plant-atmosphere interaction triggered by plant physiological limits leads to a sharp reduction in system diversity. In the future, in-depth research can be conducted on the selection of typical plants, the expansion of research scale, the development mechanism of drought induced shrub traits, the mutation mechanism of biogeochemical cycle induced by drought, the time node at which plants can resume their physiological activities after drought stress is relieved, and the mechanism of biological crust production. This study provides a basic framework for understanding the potential ecological mechanism of aridity threshold for vegetation guided restoration in arid mining areas, also provides an ecological basis for scientifically determining the reasonable degree of intervention and guiding the direction of restoration in the later stage.

Key words: arid mining areas; vegetation restoration; aridity threshold; resilience; mining environment

在矿山生态修复领域,践行绿水青山就是金山银山的理念,坚持人工修复与自然恢复相结合的方式被广泛采纳^[1]。基于此,卞正富等^[2]提出了“引导型矿山生态修复理念”,内涵在于依靠生态系统自身固有的恢复能力,在适当的人工干预引导下,促进采矿扰动受损生态系统快速恢复到具有系统结构和功能自维持能力的状态。白中科等^[3]对我国新时期人工支持引导生态系统自然修复的内涵进行了诠释,指出人工支持引导可以提高生态系统自然修复的速率和效果,增加生态系统稳定性和生物多样性水平。雷少刚等^[4]对引导型矿山生态修复理论进行了系统研讨,指出引导修复的合理程度或生态阈值的识别是引导型矿山生态修复技术框架中重要技术环节,生态阈值和生态参数的调控是科学引导的关键。植被作为矿山生态系统重要组成部分,高强度、大规模的井工煤炭开采对干旱矿区的植被的扰动损伤已被诸多研究证实^[5],如:矿区尺度上,从2000—2016年占神东中心矿区总面积27.65%的区域,植被NDVI呈降低趋势^[5];植物个体尺度上,永久裂缝发育区土壤水分散失加速导致植物生长受到干旱胁迫,严重的损害植物叶片光合机构的正常功能^[6]。人工引导修复受损植被无疑属于“引导型矿山生态修复理念”范畴之内。“引导修复”核心在于“引导”,蕴含的基本科学问题是,人工如何“辅助”自然恢复、人工如何与自然恢复有机“结合”?其中关键技术问题之一是,当需要人工干预时,人工干预的合理程度如何界定,或者说涉及的关键生态阈值包括哪些?如何识别^[4]。

目前阈值的定量识别研究还处于起步阶段^[7],常用的生态阈值的确定方法主要有统计分析(应用统计模型、Meta分析)和模型模拟(过程模型、系统动力学模型、概念模型等)2种方法^[8],上述方法均是基于大量野外数据(野外观测、遥感监测和大尺度的观测网络)分析获取。我国学者们通过野外数据分析限制性因素对生态要素的作用关系,提出了干旱矿区生态系统阈值识别技术,初步探明了地下水位埋深、土壤含水量、植物丰度、根系损伤量的关键阈值,如:湿生、旱生和沙生植被发生演替的地下潜水位阈值是3.2、8.0、14.0 m^[2,5],植物生长胁迫和死亡的生长季土壤含水量分别是8.91%和4.87%^[9],植被恢复的丰度阈值是36.60%~45.30%^[9],关键建群种植物枯萎的根系损伤量阈值是30%^[10],不同阈值区间矿区植被系统结构和功能属性会发生改变。在干旱矿区,土壤含水量是植物生长最重要的直接限制因素,地下水对表土水分的补给起着决定性作用,是影响植物生长发育的间接限制因素^[6]。地下资源开采引起的植物干旱胁迫,无论是地下水位埋深还是土壤含水量,可用土壤干旱度来表征,相应的地下水位埋深、土壤含水量阈值转换为土壤干旱阈值^[11]。

生态系统具有一定程度的自我调控能力,即:当系统中某一要素发生变化时,其他要素出现相应变化,这些变化又反过来影响最初发生变化的那种要素,使系统内的所有成员彼此相互协调,从而维持着系统结构和功能平衡^[12]。这里定义生态机制为生态系统各要素之间的结构关系和运行的变化规律。植物对干

旱的响应存在的多种生态机制, 植被系统结构和功能属性对干旱阈值响应具有区间效应^[13]。首先, 当干旱度超过某一阈值时, 系统结构和功能缓慢变化, 这种变化短期内呈线性变化, 一般发生在植被衰退初期阶段, 生态机制可能与植物光合生理变化有关^[12]; 然后, 随着干旱度进一步加剧, 系统结构和功能产生突然变化, 这种突变一般呈非线性态, 这主要与人类活动 (如地下采矿) 导致植物生长的“土壤失调”密切相关^[14]; 最后, 干旱度加剧达到极限状态, 由于阈值突破而产生的突变致使系统进入另一种很难自恢复的状态 (如沙漠), 该干旱度为“系统崩溃”的临界阈值^[15], 主要与干旱加剧突破植物生理极限触发植物-植物和植物-大气的互馈作用有关^[13]。综上所述, 现有研究针对干旱阈值识别方法、阈值表征、区间效应及单一阈值区间内生态机制进行了成功探索, 但是对不同干旱阈值区间内引发植被系统结构和功能属性变化的生态机制缺乏系统深层次挖掘。为此, 笔者从干旱阈值区间效应角度, 分别对各区间内植被系统结构和功能属性变化潜在的生态机制展开进一步分析梳理。

1 干旱矿区植被系统对干旱响应概念模型

我国干旱区在广义上既包括分布在 35°N 以北、106°E 以西的广大内陆河流域, 也包括分布在北方农牧交错带的半干旱地区^[16], 年降水量在 200 mm 以下

的地区称为干旱区, 年降水量在 200~500 mm 的地区称为半干旱区。年平均降水量低于蒸发量, 生态环境脆弱, 极易受到气候变化和人类活动的影响^[17]。我国干旱区主要分布在新疆、内蒙古高原西部、青藏高原西北部; 半干旱区分布地区在内蒙古高原、黄土高原的一部分、青藏高原大部。分布在干旱和半干旱区重点煤矿区包括: 宁夏石嘴山矿区、灵武矿区, 陕西榆神矿区、旬耀矿区, 甘肃华亭矿区, 内蒙古神东矿区、准格尔矿区、平庄矿区、胜利矿区, 新疆准东矿区等 (图 1, 矢量边界来源于国家基础地理数据信息库)^[18]。上述矿区以风沙地貌或荒漠地貌为主, 地带性土壤为灰漠土、灰棕漠土、棕漠土和风沙土, 具多孔状结皮、有机质质量分数低、碳酸钙表聚性、石膏和易溶性盐分在剖面下部积聚, 土壤层厚度一般较薄, 处于干燥状态, 持水性能较差, 成土作用微弱, 母质较粗的共同特征^[19]。气候变化、人类活动 (如: 矿产资源开采) 导致的干旱度增加^[20], 将对植被系统结构和功能属性 (如: 如养分循环、植物生产力和微生物群落) 产生深刻影响^[21], 进而影响生态系统服务价值^[22]。

干旱度加剧导致系统结构与功能的变化方式可能是渐变型或突变型^[23]。根据现有植被结构和功能属性对全球干旱梯度变化响应的研究结果, 上述响应大多呈非线性关系^[24]。即: 一旦突破某个干旱度临界水平, 干旱度的小幅度增加都会导致系统结构和功能

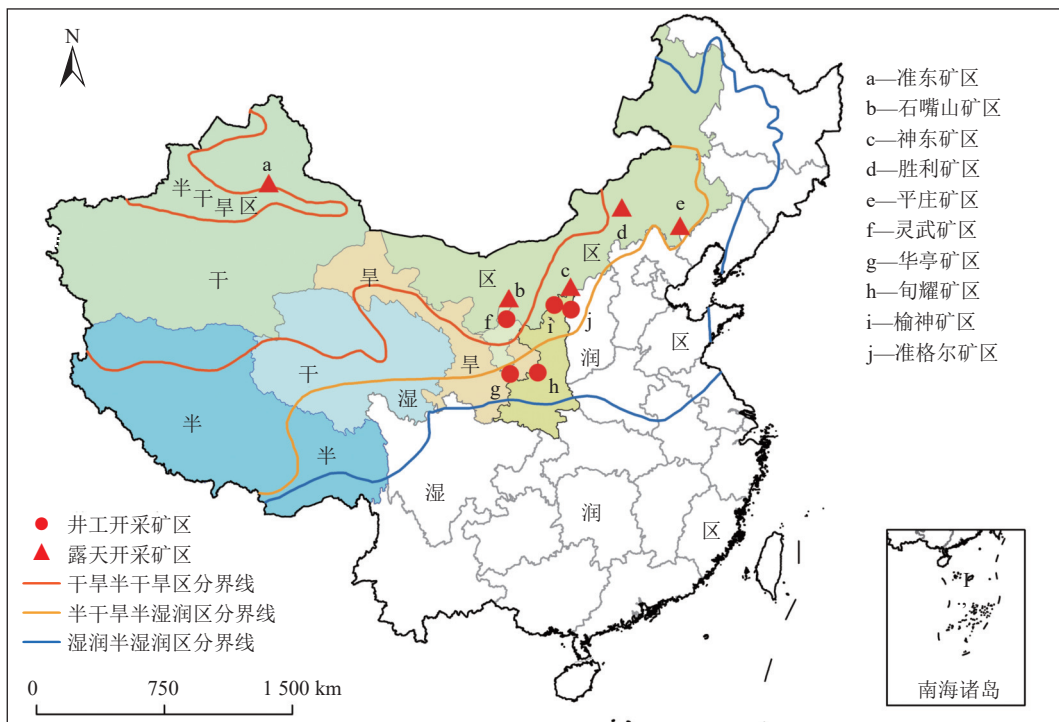


图 1 我国干旱和半干旱区重点煤矿分布

Fig.1 Location of key coal mine areas in arid and semi-arid regions of China

属性发生剧烈变化。与线性单调模型相比, 非线性模型对这种响应具有更高的解释度^[25-26]。植被系统结构和功能属性对于干旱加剧的响应存在一系列连续的干旱阈值, MIGUEL Berdugo 等^[13] 对干旱度的概念进行了界定, 给出了干旱度的计算方法, 将干旱阈值划分为 3 个阶段, 指出进入每个阶段都会导致植被系统结构或属性发生变化^[12]。

第 1 阶段: 当干旱度在 0.50~0.70 时, 植物个体尺度上, 表现为叶片气孔导度与光合作用效率降低, 光合能力随着干旱度的增加而降低^[27]; 生态系统尺度上, 植被归一化指数、植物生物量与干旱度呈负相关, 植被生产力急剧下降^[13]。随着干旱度的增加, 系统首先进入“植被衰退阶段”。

第 2 阶段: 当干旱度在 0.70~0.82 时, 生态系统特征和功能发生突然或非线性变化, 包括: 微生物功能群落丰度^[28]、菌根相对丰度^[29]、真菌丰度^[30]、土壤团聚体的稳定性^[31]、养分及有机质含量^[32]、个体叶片中的氮含量^[33] 等。第 1 阶段中植被生产力下降, 有机物量减少, 引起植物冠层对土壤有机碳的补给作用急剧下降, 土壤养分下降, 腐生真菌相对丰度降低^[34]。植物-土壤、植物-植物积极互作频率降低, 植被从草

原和稀树草原转变为灌木丛^[12]; 植被对气候波动的敏感性急剧下降^[13]。随着干旱度不断增加, 系统进入“土壤失调”阶段。

第 3 阶段: 当干旱度大于 0.82 后, 土壤水势低于萎蔫点, 植物区系发生剧烈更替^[35], 叶片应对干旱胁迫的策略由耐逆转向逃避^[36]。大多数乔木、灌木与草本植物均难以在这种极端缺水和养分匮乏的环境下存活^[37], 植物物种丰富度和植物覆盖率急剧下降, 地表反照率呈指数增长, 荒漠化程度加剧^[38]。土壤病原真菌的相对丰度突然增加导致真菌疾病的发病率大增, 从而加重负面影响^[12]。随着干旱度持续增加, 系统进入“系统崩溃”阶段。

依据上述综述总结的干旱区植被系统属性随干旱度增加而发生的 3 次连续非线性变化的一般框架, 构建干旱矿区植被系统对干旱的突变响应概念模型(图 2), 以了解随着干旱程度的增加, 突变如何出现。后文将逐一总结和剖析各种潜在的生态机制。

2 干旱阈值与植被衰退阶段相关的生态机制

地下水、土壤水、植被作为干旱矿区关键生态要素, 彼此间存在着复杂的动态平衡关系。井工煤炭开

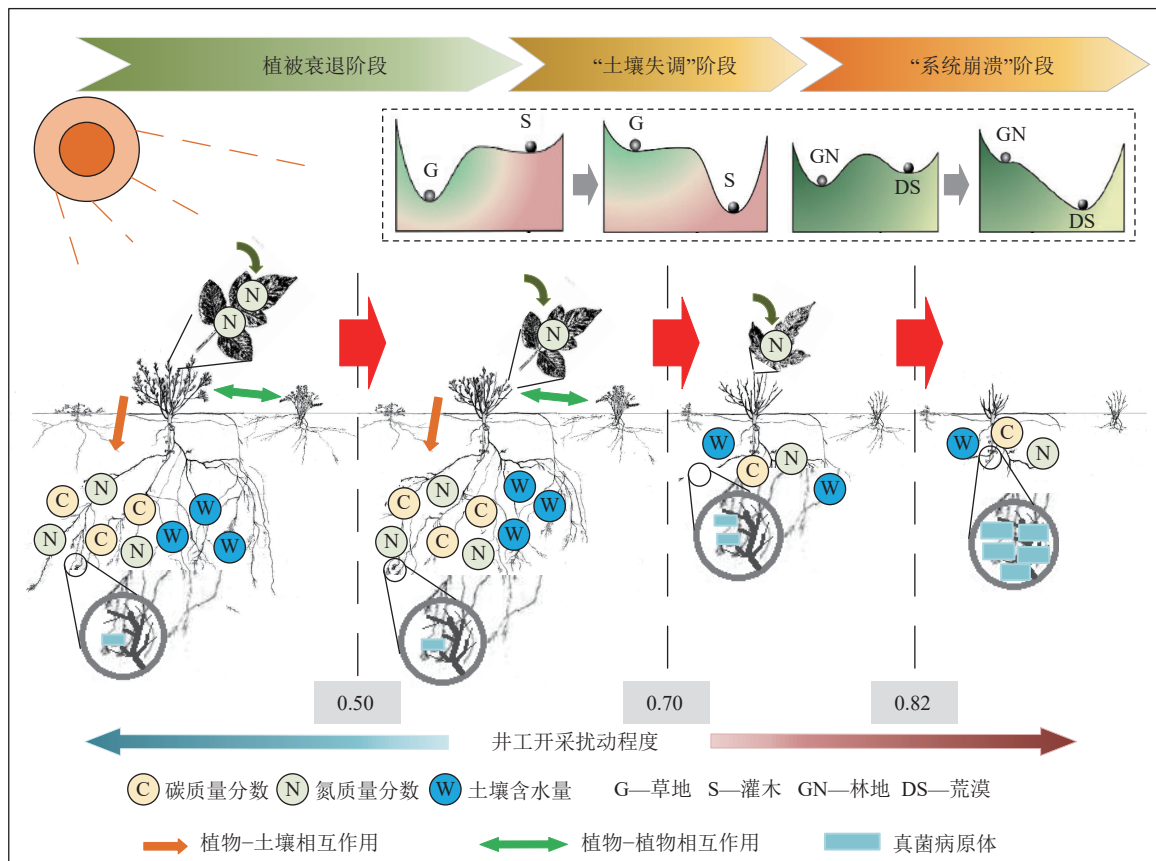


图 2 干旱矿区植被系统对干旱响应的概念模型

Fig.2 Conceptual model of response of vegetation system to drought in arid mining areas

采引起地表沉陷破坏原始土体结构、降低土壤的持水性、降低地下水位,直接打破了这种平衡关系,一旦土壤含水量持续降低突破了干旱阈值,引起植被生长协同损伤而导致植被衰退^[9]。在植被衰退阶段,植物生物量随干旱程度增加而显著降低,植物生长的关键驱动因素由温度转变为降雨量,本质上是植物对日益严重水分匮乏的适应,属于典型的非线性变化关系^[12]。当干旱度大于 0.50,土壤水分是叶绿素荧光变化的主控因素,水分有效性随着干旱度的增加而减少^[39]。在长期演替过程中,干旱区植物形成了适应特殊环境条件的能力,表现出对极端缺水环境的多种适应和特性,如借助自身生物学特性和形态上的一些特征在干旱条件下保持植物体内适宜的含水量,如叶片变的小且肥厚、气孔导度降低、叶片退化以同化枝来进行光合作用、根系向深层地下发育等;在生理、生化上也具有耐旱或抗旱的机能,通过加强植物吸水能力和保水储水能力,以适应干旱,如提高细胞液浓度,降低叶细胞水势,提高原生质水合程度等^[40]。上述适应方式与特征使得植物在干旱胁迫条件下通过气孔关闭减少水分蒸发散失,极大程度地应对水分短缺^[41]。然而,这也限制了光合作用的正常功能(气孔关闭减少 CO₂ 摄

入量),仅能维持植物光合生理机构在干旱胁迫下低效运转,意味着在生态系统尺度上植物光合能力降低,仅保证植物在恶劣条件下能够存活,从而增加了生态系统在干旱胁迫下维持其功能完整性的能力^[42]。由于植物这种缺水适应机制的存在,迫使植物改变叶片生物学和形态特征并产生群落更替^[43],进而导致更大尺度上植被归一化指数、生物量的降低^[44],即植物衰退阶段的开始(图 3)。

研究植物叶片生物学和形态特征或者光合生理变化的干旱度阈值对于干旱矿区受损植被引导修复极具现实意义。笔者前期通过大量干旱梯度观测,构建了土壤体积含水量和柠条叶片最大光合作用效率 F_v/F_m 的响应函数,发现当土壤体积含水量低于 8.91% 时, F_v/F_m 随着土壤含水量的降低急剧降低,柠条生长受到了干旱胁迫;当土壤体积含水量为 4.89% 时, F_v/F_m 趋近于 0,此时植物叶片光合结构基本完全失活,认为 4.89% 为柠条死亡的土壤含水量阈值^[4, 8]。但是,将这两阈值作为干旱矿区受损植被引导型修复合理程度的标准还存在明显缺陷。一方面,由于单纯针对某一矿区而言,其面积通常较小,跨越的生态系统类型不够,导致干旱矿区没有显示足够宽的干旱梯

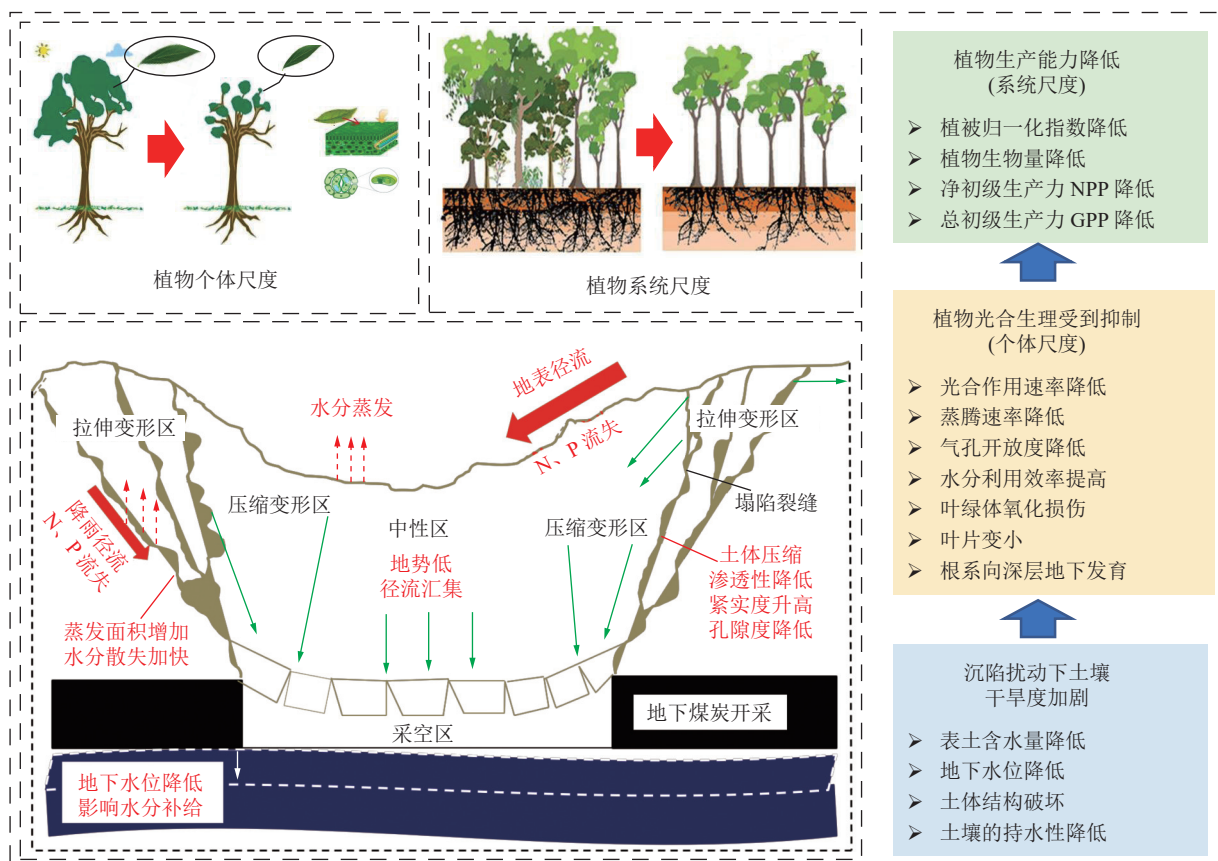


图 3 衰退阶段个体和系统尺度植物对干旱度加剧的响应表现

Fig.3 Response of plants to the intensification of drought at individual and system scales

壤含水量下降最为明显,从采前的 11.8% 降低至 5.5%, 压缩区土壤含水量从采前的 11.9% 降低至 8.4%, 且开采结束后拉伸区、压缩区土壤含水量恢复极为缓慢, 中性区土壤含水量整体在 8.9%~12.1% 波动^[9]。当土壤含水量在此扰动下持续降低直至不能满足植物生理活动需要时,会对植物生长形成干旱胁迫,植物叶片光合生理活动随之受到影响^[9]。

上述地下采煤—岩层运动—土体变形—土壤地质条件改变—植物干旱胁迫过程离不开土壤侵蚀过程的参与。有 2 种机制将土壤侵蚀与地下采煤引起的干旱胁迫联系起来。第 1 种机制与土壤侵蚀和植被之间的相互作用有关,即所谓的植物—土壤侵蚀反馈^[46]。该机制建立的基础在于,如果植物覆盖度降低,土壤保水持水能力变差,土壤更易受到侵蚀作用,而这将进一步导致植物覆盖度的减少^[51]。荒漠化理论研究中描述产生替代稳定状态时常采用这种植物—土壤侵蚀反馈机制^[46]。该反馈的触发因素(植被覆盖减少)已在全球干旱地区干旱度阈值在 0.70 水平时观察到,而这又与植被衰退阶段植物在干旱胁迫下光合生理活性不断下降密切相关^[13]。这种覆盖度突然减少可能会引发的土壤流失加剧,相关研究对植被覆盖度与土壤可蚀性阈值进行研究发现,植被覆盖度低于 30% 时,土壤侵蚀的加速^[52]。第 2 种机制是与干旱引起的侵蚀作用方式相对重要性的变化有关。随着干旱程度加重,风力侵蚀相对于水力侵蚀的作用更重要^[53]。土壤风力侵蚀对土壤颗粒大小的强烈依赖,意味着风力侵蚀对细小颗粒的偏好,随着时间的推移,细小颗粒含量的变化可能会改变土壤质地性质,从而改变土壤保水持水能力^[54]。此外,风力—水力侵蚀交换对植被空间布局的形成具有重要影响^[55],并受植物覆盖度和植物生活型的影响^[56]。

3.2 灌木入侵途径

在干旱诱导触发下,植被系统属性和功能受到强烈扰动,植被类型向灌木主导的景观转移。灌木入侵作为一种全球性现象,在干旱地区尤为明显,其特征是原生灌木的密度和覆盖度增加,优势植物物种向灌木主导的景观转变被认为是由反馈过程支撑的 2 种替代植被状态之间的转变^[57]。虽然灌木入侵本身与干旱度增加没有特别的联系,但与其他形式的土地退化(如,地下采矿)及气候变化有关,且可通过如下反馈机制来解释。草地通常表现为地面的连续覆盖,比灌木更有效地保护土壤免受侵蚀。采煤塌陷裂缝增加水分蒸发面积,而蒸发面积的发育深度与地下煤层开采高度密切相关,据统计我国西部开采条件较好的状况下,采高通常在 2.0~7.0 m^[5]。换言之,采煤塌陷裂缝的发育主要会降低地表浅层土壤含水量。在此条件下,由于草本植物根系本身较浅,其生长主要利用浅层土壤水分和养分,比灌木对侵蚀引起的土壤水分流失更敏感^[58]。因此,由灌木取代草本植物引起的侵蚀动力学变化也激发了灌木驱动的土壤侵蚀反馈,进一步促进了灌木群落的建立,相应的草本植物群落的建立被削弱。然后灌木通过对土壤风蚀物质、降尘和凋落物等途径截获水分和养分,在根际形成灌丛“肥岛”效应,并通过发达的根系以根际沉积的形式向土壤输入大量的有机物质,从而使周围土壤的肥力性状得以改善,促进了“肥岛”的发育^[59]。

上述反馈机制将灌木入侵途径与上述土壤侵蚀途径联系起来,且可以解释为什么在干旱诱导下植被类型会向灌木主导的景观转移(图 5)、为什么灌木群落的演替会影响土壤肥力发育等问题。由于灌木在保持水分养分方面的重要作用,可作为矿山生态修复中的“生态系统工程师”,改善土地退化区土壤水肥状

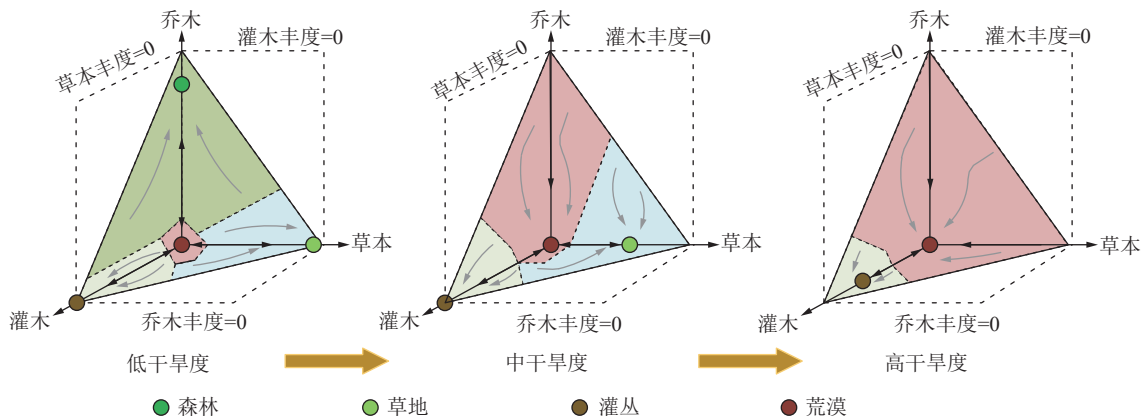


图 5 随干旱程度增加草地、灌丛、森林和荒漠植物景观转变

Fig.5 Changes of grassland, shrub, forest and desert plant landscape with the increase of drought degree

况, 逐渐提高植被覆盖度^[60]。因此, 利用功能特性方法探索采煤沉陷干旱诱导的灌木性状发育机制, 对于受损植被引导修复极具指导价值。特别是研究沿干旱梯度的相关灌木植物性状之间的协同变化有助于揭示其水养吸收策略 (根系形态和叶片水养吸收)、叶片为适应环境改变的光合生理变化 (叶面积、水分利用效率、光合作用速率、蒸腾速率、气孔开放度等) 和植物生长演替之间的权衡。通过这样, 可以阐明在灌木发育的功能结构在“土壤失调”阶段变化响应, 并了解干旱诱导的灌木发育是否仅与某些类型的灌木有关, 从而为干旱矿区引导植被重建中典型植物的选择提供参考。

3.3 生物地球化学途径

这一途径成立的前提是地下采矿引起的干旱程度加剧限制了生物地球化学循环, 降低了养分循环的效率, 使土壤贫瘠化, 并对系统结构与功能属性造成了影响。一种生态学解释是, 微生物是土壤中养分循环和碳储量调节的关键驱动因素, 被称为地球关键元素循环过程的引擎, 养分分解和循环速率受有效含水量的调控^[61]。参与养分循环的分解者群体, 如病原线虫, 对干旱程度的增加特别敏感, 其生理极限的干旱度阈值在 0.70 左右^[62]。在全球干旱地区, 研究发现土壤真菌和细菌的丰度及多样性随着干旱度的增加呈线性下降趋势^[63], 但丰度及多样性的下降在微生物群体中并不均衡, 导致在这种干旱程度下微生物组成的急剧变化^[28]。特别是与养分分解和再分配相关的关键微生物群, 在“土壤失调”阶段急剧减少^[13]。

生物地球化学途径另一种生态学解释是, 通过输入凋落物分解转化影响土壤养分循环。凋落物分解转化是生态系统养分循环的重要过程, 是土壤最重要的养分来源^[64], 因此凋落物数量或质量的变化会对土壤养分状况产生重要影响^[65]。养分转化流入土壤的同时, 还存在一部分向植物根系表面运移被植物所吸收, 一部分受土壤侵蚀作用改变养分的空间分布格局^[66]。由于前述的植被衰退阶段植被生产能力降低, 及随着干旱程度的增加微生物对凋落物分解能力减弱, 特别是在土壤侵蚀增加的情况下, 植物凋落物的输入可能不足以使土壤保持足够的肥力^[12]。反之, 贫瘠的土壤养分质量分数会影响植物营养的汲取, 表现为在这种干旱水平下叶片氮质量分数的减少^[67]。此外, 依赖深层土壤水可用性的系统 (如干旱灌木林地) 土壤养分含量在剖面上的空间异质性更大^[68], 深层土壤层通常比浅层土壤层含有更少的养分。

上述 2 个层次的养分循环受凋落物的数量质量控制且存在复杂的相互作用。例如, 菌根真菌也对植

物营养物质的汲取调动起重要作用^[69], 其优势种的变化会调节植物对水分和养分匮乏的响应, 而水养资源匮乏又对植物-菌根共生产生抑制作用^[70]。此外, 植物-菌根共生体的物种特异性作用将植物和菌根群落紧密联系在一起, 因此, 植物群落的转移通常涉及菌根的转移, 从而影响整个养分循环机制的运转^[71]。土壤水养匮乏表现出与某些菌根群有关的不稳定聚集体, 对侵蚀更为敏感, 将生物地球化学机制与侵蚀途径联系起来, 并阻碍“土壤失调”阶段所述的 3 种途径之间的循环^[72]。生物地球化学途径对研究干旱阈值极具战略意义, 由于生物地球化学途径极为复杂, 生物地球化学循环产生突变的反馈机制还鲜有报道。未来可重点研究以菌根真菌类型为标志的广义生态系统养分循环机制, 简化促进新一代可能与干旱阈值研究相关理论机制的发展。

4 干旱阈值与“系统崩溃”阶段相关的生态机制

与“系统崩溃”阶段相关的生态机制致力于解释大规模的植被系统崩溃, 包括在干旱度为 0.82 时出现的多年生植物物种丰富度和覆盖度的突然下降, 及在此干旱度下, 旱地植物区系发生了剧烈的更替, 导致叶片干旱胁迫应对策略从耐受胁迫转变为回避胁迫, 如图 6 所示。假设植被覆盖的急剧下降具有生理极限, 且通过植物-植物和植物-大气水平的反馈作用实现的, 而不同的机制可能与干旱度阈值相关。

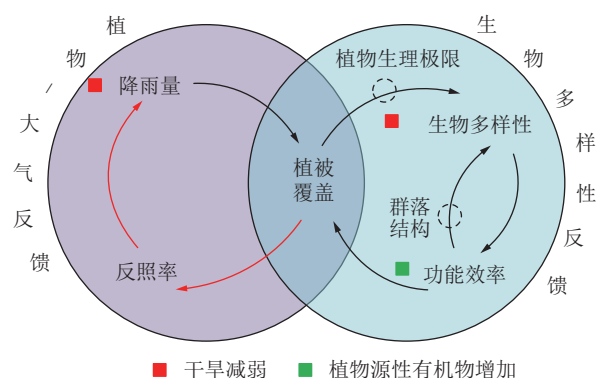


图 6 干旱阈值与“系统崩溃”阶段潜在的生态机制

Fig.6 Aridity threshold and potential ecological mechanism in the “ecosystem breakdown” phase

4.1 植物生理极限

相关研究表明干旱度 0.82 与植物的生理极限有关, 此时土壤水势在一年中的大部分时间都低于维管植物的萎蔫点, 进而影响植物存活率^[73]。同时该阈值下植物物种丰富度显著降低, 植被生长限制在物种间

有很强的趋同性,这与生态位缩小到唯一的限制因素水有关,强调了由于生态位极限收敛而导致的物种灭绝的非线性本质^[74]。这解释了在这个阈值中观察到的物种突然消失现象。在水分缺乏条件下,气孔调节、渗透势调节、抗氧化防御和碳酸酐酶活性是植物应对干旱的主要生理途径,常作为一个有机系统协同应对干旱^[75],而这种协同主要由脱落酸参与介导^[76]。脱落酸是植物体内一种重要的植物激素,可调节逆境反应、代谢变化、基因表达、种子休眠、幼苗生长和植物蒸腾等^[76]。脱落酸的抗旱机理是植物根系感应周围土壤水分环境,快速合成并迅速通过木质部蒸腾流运输到地上部分,从而调节地上部分生理过程来实现的^[77]。因此,随着水分亏缺度不断加重,植物体内脱落酸的含量将会逐渐升高。但过高浓度脱落酸会抑制根系生长,促使叶片脱落^[77],这可解释地下采矿扰动下土壤含水量持续降低导致植被覆盖度降低的现象。需要说明的是,脱落酸含量升高致使的叶片脱落受干旱胁迫持续时间的影响,未来可针对干旱胁迫解除后,植物能够自行恢复其生理活动的时间节点进行研究,对干旱矿区植被引导修复过程中在什么时候进行引导具有重要指导意义。

此外,在干旱度为 0.82 时,降水的年际变化呈指数波动,增加的降水不确定性比总降雨量对植物存活的影响更大,一些植物可能能够比其他植物更好地应对这种变化,表现出干旱胁迫的回避^[78]。据野外观测知一些生物能在非常高的干旱值下茁壮成长。如植被的衰退往往会导致生物结皮(生活在土壤表面的地衣、藻类和苔藓)的形成,这些生物结皮能够进行光合作用,并应对干旱区中的极端气候^[79]。这些生物结皮会影响生态系统的水循环,充当植物再生或土壤功能改善的“先驱者”^[80]。因此,在“生态系统崩溃”阶段矿区植被引导修复过程中,应更加重视干旱区的生物结皮保护。在这些极端干旱情况下,还应注意小气候本底条件(岩石的存在、坡度、坡向等)等的保护重建,为生物结皮的形成提供了关键容身地。

4.2 生物多样性反馈

在“系统崩溃”阶段出现的生物多样性降低归因于在群落水平上发生的反馈(即植物-植物相互作用),这可能存在 2 个重要的潜在生态机制。首先,植物之间的相互作用通过竞争和协同促进形成了稳定的丰度和结构^[81]。这种相互作用的结构可能在复杂网络中高度组织化,使得特定植物物种对于逆境的响应程度依赖于伴生物种的反应^[82]。一方面,水资源匮乏造成的强大筛选作用会导致生态位趋同,这通常与植物之间竞争作用的频率增加有关(相似性限制原则),由

于群落水平(植物-植物之间)竞争排斥而增加多样性损失^[83]。另一方面,即使在极端环境中,促进性相互作用也是适应性较差的植物生存的关键,这使得植物-植物相互作用网络嵌套在关键物种上,其物种的减少可能导致级联灭绝^[84]。这些级联效应甚至可以通过营养级发挥作用,涉及植物以外的群体,甚至影响微生物多样性^[85]。因此,了解这些群落中的物种-物种相互作用非常重要,特别是作用强度和层次结构。但是,旨在通过极端干旱环境中揭示植物群落相互作用的研究仍然不够充分,通常没有评估植物的生理极限。其次,植物多样性与更高水平的土壤养分循环和肥力有关^[86],也与生产力和生态系统稳定性有关^[87]。因此,多样性的减少可能会导致生态系统层面的不稳定,而在“生态系统崩溃”阶段植物多样性急剧降低可能会加速这种崩溃。上述生物多样性-生态系统功能关系在植物系统演替阶段都是相关的,在矿区植被引导修复中研究是否存在一个临界多样性阈值点,在这个临界点上,系统结构与功能在这个特定的干旱水平上植物多样性急剧衰减显得至关重要。

4.3 植物-大气反馈

植物和大气过程之间的强烈反馈可能会促进类似荒漠化条件的形成^[88],这些反馈建立在植物在区域尺度上对气候有重要影响的理论基础上,通常会对降雨量产生较大影响。因此,植物覆盖的减少,特别是特定时间的突然减少,会引起大气水气循环,从而直接或间接阻止降雨的形成^[12]。首先,植被可能通过蒸发蒸腾作用在局部范围内促进水循环,从而增加空气湿度和降雨量^[89]。其次,这种调节可能是间接的,由于植被的减少,土地粗糙度和土壤水分渗透和有效性的降低^[90],扬尘排放量和反照率的增加(在景观尺度上植被引起的干旱水平中反照率呈指数级增加)^[13],局部范围内抑制水循环强度,从而降低空气湿度和降雨量。现有考虑上述因素的气候模型表明,植被减少最终会导致进入大气的土壤水分减少,从而减少区域内的降水量^[91]。而降雨量的减少又会导致区域土壤水补给减少,干旱程度加剧,致使植被覆盖度、植物多样性降低^[13]。以上论述均与植被-大气反馈有关,这些反馈可能足以产生与荒漠化有关的系统状态改变^[92]。林地荒漠的转化是在非常高的干旱水平下跨越了广阔的空间尺度迅速实现的,这意味着处于崩溃阶段的系统修复措施需要迅速完成,否则干旱本身的增加可能会加速系统的崩溃,并达到不可恢复的稳定的状态,如沙漠^[93]。另一方面,保护或修复处于崩溃阶段边缘的生态系统,如通过植被重建增加其生物量,以此来抵消干旱程度的增加^[94]。

5 结 论

(1) 确定人工干预的合理程度是受损植被引导型修复的关键问题之一,生态阈值可以作为人工干预合理程度的判别标准。土壤水分是干旱矿区植物生长最重要的限制因素,因此,干旱阈值是重要关键生态阈值之一,明晰不同干旱阈值下潜在生态机制可为后期科学判定干预合理程度及引导修复方向提供理论基础。笔者构建了旱地生态系统对干旱的突变响应概念模型,将干旱矿区生态系统对干旱度的响应概括为植被衰退、“土壤失调”和“系统崩溃”3个阶段,分别总结和剖析3个阶段可能导致系统突变反应的潜在生态机制。在植被衰退阶段,干旱度在0.54~0.70,随着干旱程度的增加,植被为应对极端缺水环境其光合生理适应方式和特性发生改变;个体尺度上,表现为叶片气孔导度与光合作用效率降低;生态系统尺度上,归一化植被指数、植物生物量与干旱度呈负相关,植被生产力急剧下降。在“土壤失调”阶段,干旱度在0.70~0.82,主要涉及土壤和植物之间复杂互馈作用,包括土壤侵蚀(土壤破坏)、灌木入侵(灌草演替)及生物地球化学转化(植物-土壤依赖)3种传递途径。在系统崩溃阶段,干旱度大于0.82,主要由于植物生理极限触发植物-植物和植物-大气的互馈作用,导致系统多样性急剧降低。

(2) 干旱区井工煤炭开采扰动导致地表土壤含水量降低,土壤含水量持续降低突破了干旱阈值后,将会引起植被生长协同损伤而导致植被退化。揭示干旱阈值下蕴含的生态机制是一个涉及多学科、多要素、多过程、多领域的科技难题。需要说明的是,本文提出的干旱度主要通过总结国外相关研究文献得到,这些文献的研究结果对于剖析干旱矿区植被引导型修复中干旱阈值的生态机制具有重要的参考价值,但是这些研究结果基本没有涉及地下采煤对土壤干旱状况扰动,上述阈值是否适用于我国干旱矿区还有待进一步考究。因此,如何利用干旱阈值科学预判受损植被的人工干预合理程度,助力实现矿山受损植被引导修复,一方面,需开展大量的野外监测实验,通过广泛选择干旱矿区典型植物,在覆盖不同系统类型的研究尺度上进行扩展,科学获取适应我国干旱矿区植被受损的干旱阈值;另一方面,还需加强对干旱诱导的灌木性状发育机制、干旱诱导的生物地球化学循环突变机制、干旱胁迫解除后植物能够自行恢复其生理活动的时间节点、生物结皮产生机制等方面深层研究。

(3) 干旱矿区受损植被引导修复首先应以“土壤失调”治愈为抓手,特别是对拉伸型裂缝区采取工程

措施加以整治,增强土壤抗侵蚀能力与水土保持能力,同时保护生物结皮,为后期植被重建创造良好的生长土壤水肥条件;其次,修复初期应从本地灌木植物抗干旱驯化方面入手,利用驯化后种植的灌木根际形成的灌丛“肥岛”效应,辅以菌根真菌修复技术,增强生物地球化学循环,综合改善提升修复区土壤的水肥状况,逐步建立稳定的植物群落结构。

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 卞正富,雷少刚,金丹,等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 190-197.
BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 190-197.
- [3] 白中科,师学义,周伟,等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 1-9.
BAI Zhongke, SHI Xueyi, ZHOU Wei, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 1-9.
- [4] 雷少刚,卞正富,杨永均. 论引导型矿山生态修复[J]. *煤炭学报*, 2022, 17(2): 915-921.
LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, YANG Yongjun. Discussion on mine ecological construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 17(2): 915-921.
- [5] 刘英,雷少刚,陈孝杨,等. 神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3319-3331.
LIU Ying, LEI Shaogang, CHEN Xiaoyang, et al. Temporal variation and driving factors of vegetation coverage in Shendong central mining area based on the perspective of guided restoration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3319-3331.
- [6] LIU Ying, LEI Shaogang, CHEN Xiaoyang, et al. Disturbance mechanism of coal mining subsidence to typical plants in a semiarid area using O-J-I-P chlorophyll a fluorescence analysis[J]. *Photosynthetica*, 2020, 58(5): 1178-1187.
- [7] MARTEN Scheffer, JORDI Bascompte, WILLIAM A Brock, et al. Early-warning signals for critical transitions[J]. *Nature*, 2009, 461(3): 53-59.
- [8] 唐海萍,陈姣,薛海丽. 生态阈值:概念、方法与研究展望[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(9): 932-940.
TANG Haiping, CHEN Jiao, XUE Haili. Ecological thresholds: Concept, methods and research outlooks[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932-940.
- [9] 刘英. 半干旱煤矿区受损植被引导型恢复研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LIU Ying. Study on guided restoration of damaged vegetation in semi-

- arid coal mine area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [10] 程林森. 半干旱矿区地表沉陷对植物叶绿素荧光的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
CHENG Linsen. Monitoring on the chlorophyll fluorescence change of plants caused by coal mining subsidence in semi-arid area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [11] 王嵩, 冯平, 李建柱. 地下水生态环境控制指标问题的研究现状[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 98–103.
WANG Song, FENG Ping, LI Jianzhu. The studying situation of eco-environmental control index for groundwater[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 98–103.
- [12] MIGUEL Berdugo, BLAI Vidiella, RICARD V Solé, et al. Ecological mechanisms underlying aridity thresholds in global drylands[J]. *Functional Ecology*, 2021, 36: 4–23.
- [13] MIGUEL Berdugo, MANUEL Delgado-Baquerizo, SANTIAGO Soliveres, et al. Global ecosystem thresholds driven by aridity[J]. *Science*, 2020, 367(6479): 787–790.
- [14] WANG Chao, WANG Xiaobo, LIU Dongwei, et al. Aridity threshold in controlling ecosystem nitrogen cycling in arid and semi-arid grasslands[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4799.
- [15] MIGUEL Berdugo, SANTIAGO Soliveres, SONIA Kéfi, et al. The interplay between facilitation and habitat type drives spatial vegetation patterns in global drylands[J]. *Ecography*, 2019, 42(4): 755–767.
- [16] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. *科学通报*, 2001, 46(22): 1851–1857.
ZHAO Wenzhi, CHENG Guodong. Review on several issues in the study of ecological hydrological processes in arid areas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1851–1857.
- [17] XIAO Wu, ZHANG Wenkai, YE Yanmei, et al. Is underground coal mining causing land degradation and significantly damaging ecosystems in semi-arid areas? A study from an Ecological Capital perspective[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31: 1969–1989.
- [18] 卞正富, 于昊辰, 侯竟, 等. 西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 338–350.
BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, et al. Influencing factors and evaluation of land degradation of 12 coal mine areas in Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 338–350.
- [19] 倪健, 郭柯, 刘海江, 等. 中国西北干旱区生态区划[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 175–184.
NI Jian, GUO Ke, LIU Haijiang, et al. Ecological regionalization of Arid Area in Northwest China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 175–184.
- [20] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 117–125.
QIN Jingxiu, HAO Xingming, ZHANG Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 117–125.
- [21] 丁威, 王玉冰, 向官海, 等. 小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(1): 33–43.
DING Wei, WANG Yubing, XIANG Guanhai, et al. Effects of Caragana microphylla encroachment on community structure and ecosystem function of a typical steppe[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(1): 33–43.
- [22] LIN Sen, HU Xisheng, CHEN Hong, et al. Spatio-temporal variation of ecosystem service values adjusted by vegetation cover: A case study of Wuyishan National Park Pilot, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33: 851–863.
- [23] FILIPPO Botta, DORTHE DahlJensen, CARSTEN Rahbek, et al. Abrupt change in climate and biotic systems[J]. *Current Biology*, 2019, 29(19): 1045–1054.
- [24] TOM Andersen, JACOB Carstensen, EMILIO Hernández-García, et al. Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, 24(1): 49–57.
- [25] 赵健赞, 彭军还, 宋芊, 等. 非平稳NDVI时序数据人工神经网络建模方法[J]. *遥感信息*, 2019, 34(6): 12–17.
ZHAO Jianyun, PENG Junhuan, SONG Qian, et al. Modelling method of non-stationary NDVI time series data using artificial neural network[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(6): 12–17.
- [26] 唐伟. 干旱与半干旱地区侵蚀与植被相互作用模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
TANG Wei. Study on the model of interaction between erosion and vegetation in arid and semi-arid areas [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [27] ADITI Gupta, ANDRES RicoMedina, ANA I CañoDelgado. The physiology of plant responses to drought[J]. *Science*, 2020, 368: 266–269.
- [28] MANUEL Delgado-Baquerizo, GUILHEM Doucier, DAVID J Eldridge, et al. Increases in aridity lead to drastic shifts in the assembly of dryland complex microbial networks[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31: 346–3355.
- [29] 邱丽丽, 张佳宝, 赵炳梓. 土壤干旱对两品种小麦根际土壤微生物群落组成和酶活性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(2): 116–122.
QIU Lili, ZHANG Jiabao, ZHAO Bingzi. Effect of soil drought on microbial community composition and enzyme activities in the rhizosphere soils growing two wheat cultivars[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(2): 116–122.
- [30] 徐鹏, 荣晓莹, 刘朝红, 等. 极端干旱对温带荒漠土壤真菌群落和生态网络的影响[J]. *生物多样性*, 2022, 30(3): 70–83.
XU Peng, RONG Xiaoying, LIU Chaohong, et al. Effects of extreme drought on community and ecological network of soil fungi in a temperate desert [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(3): 70–83.
- [31] 张钦弟, 刘剑荣, 杨磊, 等. 半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9057–9068.
ZHANG Qindi, LIU Jianrong, YANG Lei, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9057–9068.
- [32] 郅晨龙, 卞正富, 杨德军, 等. 鄂尔多斯煤田高强度井工煤矿开采对土壤物理性质的扰动[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1448–1456.
QIE Chenlong, BIAN Zhengfu, YANG Dejun, et al. Effect of high-

- intensity underground coal mining disturbance on soil physical properties[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1448–1456.
- [33] ZHAO Yanchuang, GUIRADO Emilio, JUAN Gaitán, et al. Aridity thresholds determine the relationships between ecosystem functioning and remotely sensed indicators across patagonia[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 1–9.
- [34] LIU Ying, LEI Shaogang, GONG Chuangang. Comparison of plant and microbial communities between an artificial restoration and a natural restoration topsoil in coal mining subsidence area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 204.
- [35] WERNER Ulrich, SANTIAGO Soliveres, FERNANDO T. Maestre, et al. Climate and soil attributes determine plant species turnover in global drylands[J]. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(12): 2307–2319.
- [36] ELIA Carraro, ANTONINO Di Iorio. Eligible strategies of drought response to improve drought resistance in woody crops: a mini-review[J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2022, 16: 265–282.
- [37] MAOYA Bassiouni, STEPHEN P Good, CHRISTOPHER J Still, et al. Plant water uptake thresholds inferred from satellite soil moisture [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020: e2020GL087077.
- [38] VALENTIN Wendling, CHRISTOPHE Peugeot, ANGELES G Mayor, et al. Drought induced regime shift and resilience of a Sahelian eco-hydrosystem[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 105005.
- [39] LIU Laibao, LUKAS Gudmundsson, MATHIAS Hauser, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally[J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 4892.
- [40] 王小彬, 蔡典雄, 高绪科. 作物的缺水反应及其抗旱生理适应性的调节[J]. *土壤*, 1997(1): 6–12, 17.
- [41] QUIROGA Emilino, GOLLUSCIO Rodolfo, BLANCO Lisandro, et al. Aridity and grazing as convergent selective forces: an experiment with an arid chaco bunchgrass[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(7): 1876–1889.
- [42] SCHWINNING Susanne, EHLERINGER James. Water use tradeoffs and optimal adaptations to pulse driven arid ecosystems[J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89: 464–480.
- [43] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1070–1082. LIU Changcheng, LIU Yuguo, GUO Ke. Ecophysiological adaptations to drought stress of seedlings of four plant species with different growth forms in karst habitats[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1070–1082.
- [44] SONG Yang, WANG Lixin, WANG Jing. Improved understanding of the spatially-heterogeneous relationship between satellite solar-induced chlorophyll fluorescence and ecosystem productivity[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107949.
- [45] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. *Climate Change, 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [M]*. Geneva: Cambridge University Press, 2013.
- [46] SCHLESINGER William, REYNOLDS James, CUNNINGHAM Gray, et al. Biological feedbacks in global desertification[J]. *Science*, 1990, 247(4946): 1043–1048.
- [47] DACID Eldridge, MATTHEW Bowker, FERNANDO Maestre, et al. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14: 709–722.
- [48] FENG Jiao, WEI Kai, CHEN Zhenhua, et al. Coupling and decoupling of soil carbon and nutrient cycles across an aridity gradient in the drylands of northern China: Evidence from ecoenzymatic stoichiometry[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(5): 559–569.
- [49] 刘辉. 西部黄土沟壑区采动地裂缝发育规律及治理技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014. LIU Hui. The development law and treatment technology of ground fissures due to underground mining in loess hilly area of Western China [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [50] 卞正富, 雷少刚, 刘辉, 等. 风积沙区超大工作面开采生态环境破坏过程与恢复对策[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(2): 305–310. BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, LIU Hui, et al. The process and countermeasures for ecological damage and restoration in coal mining area with super-size mining face at aeolian sandy site[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2016, 33(2): 305–310.
- [51] SONIA Kéfi, MAX Rietkerk, CONCEPCION L Alados, et al. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems[J]. *Nature*, 2007, 449(7159): 213–217.
- [52] ELWELL H A, STOCKING M A. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia[J]. *Geoderma*, 1976, 15: 61–70.
- [53] SUJITH Ravi, PAOLO D’Odorico, GREGORY S. Okin. Hydrologic and aeolian controls on vegetation patterns in arid landscapes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L24S23.
- [54] JUAN CRUZ Colazo, DANIEL Buschiazzo. The impact of agriculture on soil texture due to wind erosion[J]. *Land Degradation and Development*, 2014, 26(1): 62–70.
- [55] SUJITH Ravi, PAOLO D’Odorico, WANG Lixin, et al. Form and function of grass ring patterns in arid grasslands: the role of abiotic controls[J]. *Oecologia*, 2008, 158: 545–555.
- [56] SETH Munson, JAYNE Belnap, GREGORY Okin. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(10): 3854–3859.
- [57] ANDELA N, LIY Y Y, VAN DIJK, A I J M, et al. Global changes in dryland vegetation dynamics(1988–2008) assessed by satellite remote sensing: combining a new passive microwave vegetation density record with reflective greenness data[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2013, 10: 8749–8797.
- [58] SHEN Xiangjin, LIU Yiwen, LIU Binhui, et al. Effect of shrub encroachment on land surface temperature in semi-arid areas of temperate regions of the Northern Hemisphere[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108943.
- [59] 刘进辉, 王雪芹, 马洋. 沙漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆-丘间地系统土壤养分空间异质性[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 979–990. LIU Jinhui, WANG Xueqin, MA Yang. Spatial variation of soil nutrients of *Tamarix ramosissima* nebkhas and interdune areas in a

- desert-oasis ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 979–990.
- [60] HE Yongtao, WANG Fang, NIU Ben, et al. The facilitation of restoration by cushion plant androsace tapete in a degraded alpine grassland[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 107–112.
- [61] JENNIFER Soong, LUCIA Fuchslueger, SARA MarañonJimenez, et al. Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 1953–1961.
- [62] XIONG Dan, WEI CunZheng, E. R. JASPER Wubs, et al. Nonlinear responses of soil nematode community composition to increasing aridity[J]. *Global Change Biology*, 2020, 29(1): 117–126.
- [63] FERNANDO Maestre, MANUEL Delgado-Baquerizo, THOMAS C Jeffries, et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(51): 15684–15689.
- [64] 刘文飞, 沈芳芳, 徐志鹏, 等. 氮沉降对杉木人工林凋落物分解过程中养分释放的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 695–701.
LIU Wenfei, SHEN Fangfang, XU Zhipeng, et al. Impacts of nitrogen deposition on nutrient release during leaf litter decomposition in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, 28(4): 695–701.
- [65] 田慧敏, 刘彦春, 刘世荣. 暖温带麻栎林凋落物调节土壤碳排放通量对降雨脉冲的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3889–3896.
TIAN Huimin, LIU Yanchun, LIU Shirong. Litter regulates the response of soil CO₂ emission to precipitation pulse in warm temperate *Quercus acutissima* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3889–3896.
- [66] 张富仓, 康绍忠, 李志军. 土壤-根系统养分迁移和吸收的数值模拟 I. 植物根系吸收养分的稳态模型[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(6): 7–10,15.
ZHANG Fucang, KANG Shaozhong, LI Zhijun. Numerical simulation of nutrient transfer and absorption in soil-root system I. A steady-state model of nutrient uptake by plant roots[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2002, 30(6): 7–10,15.
- [67] 翟培凤, 关家欣, 何鹏, 等. 沿干旱梯度樟子松人工林针叶和枝条非结构性碳水化合物及氮含量的变化[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1518–1524.
ZHAI Peifeng, GUAN Jiabin, HE Peng, et al. Changes of non-structural carbohydrates and nitrogen contents of needles and twigs in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations along an aridity gradient[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1518–1524.
- [68] JOSE IGNACIO Querejeta, WEI Ren, IVAN Prieto. Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water-use efficiency and productivity[J]. *New Phytologist*, 2021, 230: 1378–1393.
- [69] RICHARD P Phillips, EDWARD Brzostek, MEGHAN G. Midgley. The mycorrhizal-associated nutrient economy: A new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests[J]. *New Phytologist*, 2013, 199: 41–51.
- [70] 祝英, 熊俊兰, 吕广超, 等. 丛枝菌根真菌与植物共生对植物水分关系的影响及机理[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2419–2427.
ZHU Ying, XIONG Junlan, LYU Guangchao, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis on plant water relation and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2419–2427.
- [71] MOHAMMAD Bahram, TARQUIN Netherway, FALK Hildebrand, et al. Plant nutrient-acquisition strategies drive topsoil microbiome structure and function[J]. *New Phytologist*, 2020, 227(4): 1189–1199.
- [72] NIE Xiaojun, ZHANG Jianhui, SU Zhengan. Dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in relation to water erosion and tillage erosion[J]. *Plos One*, 2013, 8(5): e64059.
- [73] ANDREW F Feldman, DANIEL J SHORT Gianotti, ALEXANDRA G Konings, et al. Moisture pulse-reserve in the soil-plant continuum observed across biomes[J]. *Nature Plants*, 2018, 4(12): 1026–1033.
- [74] CHRISTOPHER H Trisos, CORY Merow, ALEX L Pigot. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change[J]. *Nature*, 2020, 580: 496–501.
- [75] 张旭阳, 刘英, 龙林丽, 等. 干旱半干旱区采煤沉陷引起的土壤水分变化及对植物生理生态潜在影响分析综述[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 48(4): 415–425.
ZHANG Xuyang, LIU Ying, LONG Linli, et al. Review on analysis of soil moisture changes caused by coal mining subsidence in arid and semi-arid areas and potential effects on plant physiology and ecology[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2022, 48(4): 415–425.
- [76] 李婉婷, 宁朋, 王菲, 等. 外源脱落酸对干旱胁迫下滇润楠幼苗生长及生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1543–1550.
LI Wanting, NING Peng, WANG Fei, et al. Effects of exogenous abscisic acid(ABA) on growth and physiological characteristics of *Machilus yunnanensis* seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1543–1550.
- [77] ZHAO Yang, CHAN Zhulong, GAO Jinghui, et al. ABA receptor PYL9 promotes drought resistance and leaf senescence[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(7): 1949–1954.
- [78] DANNY E Carvajal, ANDREA P Loayza, RODRIGO S Rios, et al. A hyper-arid environment shapes an inverse pattern of the fast-slow plant economics spectrum for above-, but not below-ground resource acquisition strategies[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(3): 1079–1092.
- [79] 房世波, 冯凌, 刘华杰, 等. 生物土壤结皮对全球气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3312–3321.
FANG Shibo, FENG Ling, LIU Huajie, et al. Responses of biological soil crusts(BSC) from arid-semiarid habitats and polar region to global climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3312–3321.
- [80] MANUEL Delgado-Baquerizo, FERNANDO T Maestre, DAVID J Eldridge, et al. Biocrust-forming mosses mitigate the negative impacts of increasing aridity on ecosystem multifunctionality in dry-

- lands[J]. *New Phytologist*, 2016, 209(4): 1540–1552.
- [81] WILLIAM K Cornwell, DAVID D. Ackerly. Community assembly and shifts in plant trait distributions across an environmental gradient in coastal California[J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79(1): 109–126.
- [82] HUGO Saiz, JESUS GómezGardeñes, JUAN PABLO Borda, et al. The structure of plant spatial association networks is linked to plant diversity in global drylands[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(4): 1443–1453.
- [83] CHRISTINA Alba, CATHERINE Fahey, S LUKE Flory. Global change stressors alter resources and shift plant interactions from facilitation to competition over time[J]. *Ecology*, 2019, 100(12): e02859.
- [84] ELISA Thébault, VERONIKA Huber, MICHEL Loreau. Cascading extinctions and ecosystem functioning: Contrasting effects of diversity depending on food web structure[J]. *Oikos*, 2007, 116(1): 163–173.
- [85] KIM Cuddington. Legacy effects: The persistent impact of ecological interactions[J]. *Biological Theory*, 2011, 6(3): 203–210.
- [86] JONATHAN S. Lefcheck, JARRETT E. K. Byrnes, FOREST Isbell, et al. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6936.
- [87] PABLO GarcíaPalacios, NICOLAS Gross, JUAN Gaitán, et al. Climate mediates the biodiversity-ecosystem stability relationship globally[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(33): 8400–8405.
- [88] DELPHINE Texier, NATHALIE de Noblet, PASCALE Braconnot. Sensitivity of the African and Asian Monsoons to Mid-Holocene Insolation and Data-Inferred Surface Changes[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(1): 164–181.
- [89] TRENBERTH, KEVIN E. Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(5): 1368–1381.
- [90] LORENZO Alfieri, PIERLUIGI Claps, PAOLO D' Odorico, et al. An analysis of the soil moisture feedback on convective and stratiform precipitation[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(2): 280–291.
- [91] XUE Yongkang. Interactions and feedbacks between climate and dryland vegetation [M]. Dordrecht: Springer, 2006.
- [92] WANG Guiling, ELFATIH A B. Eltahir. Biosphere-atmosphere interactions over West Africa. II: Multiple climate equilibria[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(565): 1261–1280.
- [93] WANG Guiling, ELFATIH A B. Eltahir. Ecosystem dynamics and the sahel drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(6): 795–798.
- [94] OLIVER Branch, VOLKER Wulfmeyer. Deliberate enhancement of rainfall using desert plantations[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(38): 18841–18847.