

植被恢复的生态效应研究进展

胡婵娟^{1, 2}, 郭雷¹

1. 河南省科学院地理研究所, 河南 郑州 450052; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 植被在水土保持、水源涵养及生态系统的固碳过程中起着重要的作用。植被恢复是指运用生态学原理, 通过保护现有植被、封山育林或营造人工林、灌、草植被, 修复或重建被毁坏或被破坏的森林和其他自然生态系统, 恢复其生物多样性及其生态系统功能。目前, 植被的自然及人工恢复是改善脆弱生态系统及退化生态系统生态环境现状最有效的措施。植被在恢复过程中对地上植被生态系统, 物种多样性的恢复有着重要影响, 同时通过凋落物及根系的输入, 可以有效改善地下生态系统, 增加土壤的养分含量、改善土壤的物理结构、增加土壤生物的生物量及活性。文章以地上及地下生态系统为出发点, 综述了植被恢复过程中自然及人工恢复过程中不同的植被类型、不同的恢复时间下植物物种组成和多样性、土壤理化性质及土壤微生物群落的变化。植被的自然及人工恢复在一定程度上均能增加植物物种的多样性, 随着恢复年限的增加物种的组成发生改变且多样性呈增加趋势, 但一些特殊环境下不当的人工恢复可造成植被演替向退化方向发展, 降低生物多样性。不同的植被类型由于其生长方式的不同对土壤理化性质和土壤微生物的影响存在差异, 随着恢复年限的增长, 土壤理化指标及微生物学指标呈现先增加而后趋于平稳的状态。针对已有的研究进展, 提出在未来的研究过程中, 一方面应该增加更多的对比研究, 对不同环境下, 不同的恢复物种, 不同的恢复方式进行更深入地探讨; 另外一方面应增加不同尺度的研究, 现有的研究多集中在样地尺度, 未来应在更大尺度上进行分析; 再者, 地上及地下生态系统之间的相互关系及影响机理一直是土壤学科研究的热点, 植被恢复过程中应增加更多该方面的机理研究。

关键词: 植被恢复; 土壤养分; 土壤微生物; 植物多样性

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 09-1640-07

引用格式: 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.

HU Chanjuan, GUO Lei. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1640-1646.

植被作为陆地生态系统的重要组成部分, 是生态系统中物质循环与能量流动的中枢, 在水土保持、水源涵养及固碳过程中都起着重要的作用。然而, 随着社会经济的发展, 植被破坏引起的生态环境破坏日益严重, 植被的破坏不仅影响了自然景观, 同时带来环境质量下降、生物多样性降低、水土流失、土地沙化及自然灾害加剧等一系列问题, 根据全国第二次水土流失遥感调查, 20世纪90年代末, 我国水土流失面积 $356 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中: 水蚀面积: $165 \times 10^4 \text{ km}^2$, 风蚀面积: $191 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。据调查, 20世纪50年代以来呈减少趋势的沙尘暴, 90年代初也开始回升^[1]。自19世纪50年代以来, 由于植被破坏使得我国61%的野生动物的栖息地受到破坏, 大量的珍稀物种面临灭亡的威胁^[2]。研究表明^[3], 地面林草植被遭到破坏后, 土壤理化性质严重恶化, 抗冲蚀性能减弱, 侵蚀由轻微变得强烈, 而当植被得以恢复后, 土壤侵蚀迅速减弱。Zhang等^[4]对有植被和无植被覆盖

的两个小流域的研究也发现, 植被覆盖可以有效地减少水土流失和养分的流失。Zheng^[5]对黄土高原植被改变对土壤侵蚀的影响进行了相关研究也表明植被可以有效地遏制土壤侵蚀的发生。植被茎叶可以减少降雨雨滴动能, 植物茎及枯枝落叶可以减缓径流流速, 植物根系可以提高土壤抗冲抗蚀的能力, 在特殊的侵蚀环境下, 植被恢复是治理水土流失的关键措施, 而有效的遏制水土流失也是植被恢复影响地下土壤生态系统的重要途径之一。植被恢复是遏制生态环境恶化, 改善脆弱生态系统和退化生态系统的有效措施, 在植被恢复的开展过程中, 我国已启动了“天保工程”和“退耕还林还草工程”, 使得植被的恢复与重建能够在较大范围内进行。

完整的生态系统由地上和地下生态系统两部分组成, 且二者之间相互联系, 互相影响。植被恢复过程中对地上生态系统及地下生态系统均存在显著的影响, 植被的生长可以有效改善土壤的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407200-5)

作者简介: 胡婵娟 (1981年生), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事植被恢复、土壤微生物及土壤碳循环方面的研究。E-mail: huchanjuan1981@126.com

收稿日期: 2012-07-26

结构，为土壤系统输入更多的有机物质，提高土壤质量；其次可以通过改善微生物生长的微环境，提供更多的营养物质和能源物质提高微生物生物量及多样性，同时恢复过程也可以对植物的组成和结构产生影响，有利于植物物种多样性的保护。植被恢复作为改善脆弱和退化生态系统生态环境现状的有效措施，从地上和地下生态系统的角度探讨其生态环境效应，能够更加完整的论述植被恢复在整个生态系统物质循环和能量流动中的作用，也能够更好的阐述植被恢复过程对生态系统健康和生态环境改善的影响。

1 植被恢复对地上生态系统的影响

植物的群落结构和物种多样性对生态系统功能具有重要意义，对植被恢复过程中的物种多样性进行研究，可以正确认识植被恢复的过程，指示生态系统的演替过程。从生态恢复的视角对植被的演替理论进行探讨，国内有学者指出，退化生态系统一旦停止干扰，便发生进展演替，原群落的结构、功能的相似度从低向高的发展过程^[6]。自然恢复过程中的植被，通过长时期的自然演替过程，物种的多样性会发生改变最终会形成稳定的植物群落结构，而对于一些破坏比较严重的生态系统，通过自然恢复的过程不能够使植被得以良好的恢复或需要的演替时间特别漫长，根据植物的演替规律，引入演替后期阶段的物种进行及时补播，或者通过引进一些外来物种可以缩短演替时间，加速植被恢复进程。

对于植被恢复过程中植物物种和多样性已进行了大量的研究。通常的观点认为随着演替时间的推移，群落的多样性指数逐渐上升，在群落演替的中后期最大^[7-8]。退耕地自然恢复过程中植物多样性的变化受到了广泛的关注。白文娟和焦菊英^[9]对黄土丘陵沟壑区退耕地主要自然恢复植物群落的多样性进行分析后发现，随着退耕年限的增加，植被多样性指数和均匀度指数的总趋势都是增加的，且植物群落物种组成年限之间的差异不断增加。退耕地自然恢复形成的植物群落中草本植物占绝对优势，菊科植物最为丰富；植被恢复初期，植物群落的多样性较低，植被总盖度在85%以上，能够有效地防止水土流失^[10]。Zhang等^[11]对科尔沁沙地自然恢复群落的演替规律的研究发现不同的演替阶段优势物种不同，物种的替代及生境的改变是演替发生的主导因素，物种多样性和丰富度指数随演替时间增长而呈增加趋势。弃耕地植物物种数目的变化具有明显的波动性，代表立地特征的种类开始比较少，而农田杂草的种类比较多；随着演替的进行，地带性指示

植物增加，杂草类植物种类下降。也有研究表明退耕地演替群落的种类多少与生产力有关，种类多的群落生产力就高^[12]。Carla等^[13]对黎巴嫩采石场植被的自然恢复的研究中发现，在其设置的不同的恢复梯度上植物物种的组成存在很大差异，在生态系统退化比较严重的地区主要是1年生的R对策的物种，在中等退化程度的地区主要分布物种是多年生草本和灌丛，而在相对退化程度较低的地区主要是物种组成为乔木和多年生灌木。Nishihiro和Washitani^[14]在对日本湖岸植被恢复的研究中利用沉积物中的种子库进行已经灭绝和退化的植物物种的自然恢复，经过自然恢复过程，植物群落和多样性都得到很好的恢复，有180种植物其中包括6种濒临灭绝的物种和12种当地水淹植物出现在湖岸上。Mitchell等^[15]对石楠类型的退耕地研究时发现，在退耕之后的20~50年时间里，退耕地分别经历了桦木属(*Betula spp*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、蕨类(*Pteridium aquilinum*)、菌类(*Rhododendron ponticum*)4个演替阶段。

人工恢复与自然恢复方式及不同的人工恢复模式下地上植被群落的变化均存在差异。处于植被自然恢复阶段的群落其物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数均在演替的第3阶段较高；人工灌木群落的多样性指数和丰富度指数都要大于人工草本群落，但是人工草本群落的均匀度指数要比人工灌木群落大；天然植物群落比人工植物群落的均匀度指数小，但其物种丰富度、多样性指数均高于人工植物群落^[16]。王发刚等^[17]对不同人工重建措施下高寒草甸植物群落结构及物种多样性的研究发现退化草地经过多年的封育，或经松耙补播后逐步向原生植被方向演替，而人工草地则逐步向退化演替方向发展。漆良华等^[18]研究了润楠次生林、马尾松天然林、油桐人工林及毛竹-杉木林四种典型的植被恢复群落的物种多样性及生物量，研究表明乔木层物种以次生林的多样性和均匀度最高，草本层物种丰富度以人工林最高，天然林最低，物种丰富度与群落生物量之间的关系可用“S”曲线较好的描述。针对黄土丘陵区不同林龄的刺槐人工林、天然侧柏次生林、荆条灌丛和苜蓿草地等不同植被恢复类型群落特征及物种多样性变化的研究发现，通过植被恢复，物种数量提高，群落多样性得以改善，但群落丰富度指数以撂荒之后形成的荆条灌丛最高，其次是人工刺槐林且恢复年限为20年的人工林高于恢复年限为5年的人工林，物种多样性指数则以刺槐人工林最高^[19]。张健和刘国彬^[20]对黄土丘陵区沟谷地不同植被恢复模式下植物群落生物量和

物种多样性的研究中也发现了相似的结果,物种多样性指数表现为人工植被恢复模式效果优于自然恢复,人工植被建设可以促进黄土丘陵区沟谷地的植被恢复进程。但对于植被的人工恢复,一些特殊环境下,不当的物种及营造纯林,也会使植物群落结构单一化,植被正常演替中断或逆向发展,印度 Tata 能源研究院在 Fimalayas Darjeeling 地区干旱混交阔叶林采伐后的生态系统重建研究中,烧除采伐剩余物,选择材质优良林木造林,实行混农林业,且造林后头 2 年连续间作农作物,经过 35 年的生态系统恢复后,形成的混农林业改变了景观,干扰了生态系统的结构,引起了大量树种资源的损失^[21]。因此,对于需要植被恢复的地区,能够有效了解当地的实际环境条件,可以为更好的选择恰当的恢复模式奠定基础^[22],掌握植被的自然演替规律,也可以为人工恢复模式的选择提供科学依据,例如在什么样的演替阶段应该引进什么样的物种从而更好的降低其死亡率,或者也可以决定剔除外来入侵物种的最佳时期,使得植物物种的恢复朝更为有利的方向发展^[23],在生态系统的重建与恢复过程中,应该尽可能的选择当地的植物物种,并考虑不同物种在演替过程中出现的频率,这可以反应某种物种对当地环境条件的适应性^[13]。

2 植被恢复对地下生态系统的影响

2.1 植被恢复对土壤理化性质的影响

植被可以通过根系的生长改变土壤结构,通过根系分泌物、植物残体和枯枝落叶为土壤系统输入更多的有机物质,改善土壤质量。在植被恢复过程中,土壤有机质、速效氮、速效钾、全氮、速效磷含量增加,土壤 pH 值和容重降低,氮的矿化能力增强,土壤微生物生物量明显提高,酶活性增加,水稳性团聚体的数量和质量得到提高,土壤结构得到改善,土壤肥力得到提高,促进了土壤腐殖化和黏化过程,土壤抗冲性和土壤抗剪强度得到强化,土地生产力得到提高,土壤水分状况得到改善^[24]。研究植被恢复过程中土壤性质的改变可以更好地认识植被恢复的生态效应^[25],近年来,针对植被恢复对土壤性质的影响也进行了越来越多相关的研究^[26-28]。

不同的植被类型由于其生长方式不同,对土壤性质也存在不同的影响。Gong 等^[29]研究了荒地、耕地、弃耕地、人工草地、灌丛和人工林地等 6 种土地利用方式下的土壤养分,结果表明不同的土地利用类型对土壤养分的蓄积作用存在差异,植被恢复有利于提高土壤养分和土壤质量。刘世梁等^[30]研究了灌丛、撂荒地、坡耕地和人工

林 4 种典型土地利用类型下的土壤水分和土壤养分,研究发现,灌丛具有肥力岛屿的作用,可以截流、维持和改善土壤的肥力。马祥华等^[31]研究了退耕地植被恢复中土壤物理特性的变化,研究表明土壤含水量草地>灌木地>乔木地,灌木地土壤容重较大,自然恢复的植被土壤水稳性团聚体含量高于自然加人工恢复。邓仕坚等^[32]研究了植被恢复过程中不同树种混交林及其纯林土壤理化性质的变化,研究显示针阔混交林比针叶树纯林对土壤的改良作用要好。Jiao 等^[33]对灌丛、农地、草地和林地的研究表明,植被的恢复有利于降低表层土壤容重,增加土壤孔隙度,灌丛和林地中土壤有机质、全氮、速效氮和速效钾的含量高于其他土地利用方式。Chen 等^[34]对人工油松林、灌丛、坡耕地、紫花苜蓿和自然草地土壤水分的研究表明,灌丛和自然草地的土壤水分高于其他几种土地利用方式。

在植被恢复对土壤理化性质的影响中,恢复年限也是一个比较重要因素。在黄土丘陵区不同撂荒年限的自然恢复草地的研究表明土壤有机质和全氮含量随着草地恢复年限的降低而降低^[35]。Li 和 Shao 等^[36]对黄土高原中部撂荒农地 150 年土壤理化性质变化的研究发现土壤的物理性质与弃耕的时间及植被恢复的阶段具有紧密的联系,表层土壤的容重随着时间的增长显著降低。Zhu 等^[37]的研究也发现,黄土高原退耕之后自然恢复的 50 年中,土壤的侵蚀系数大幅度降低,土壤性质和结构都得到改善,在前 10 年的恢复过程中,土壤有机碳大幅度提高,之后的 20 年中,土壤的其他指标经过动态变化后达到平衡。Arunachalam 和 Pandey^[38]对印度东北部退耕年限分别为 1、7 和 16 年的弃耕地的研究发现,随着休耕年限的增长,土壤水分、有机碳和总氮呈增加趋势,而土壤 pH 值呈下降趋势。刘世梁等^[39]研究了不同人工林种植年龄下的土壤退化情况,发现随着种植年龄的增加土壤性状有所改善,但人工林种植 50 年后仍没有达到自然林的水平;同时随着人工林的种植年龄增加,有机碳与总氮的含量也相应增加,并且呈现出密切的相关性。针对典型草原不同围封年限土壤碳氮储量的研究表明,随着围封年限的增长,土壤碳氮含量呈增长趋势且在围封 14 年后植物和土壤各项理化指标达到最大值^[40]。对亚高山地区不同恢复阶段针叶林的研究表明,随着恢复年限的增加,人工林物种多样性呈增加趋势,土壤容重、含水量、有机质含量等指标也随物种多样性的增加而呈现增长趋势^[41]。Zuo 等^[42]对科尔沁沙地 0、11 和 20 年等 3 种不同围封年

限的沙丘的植被和土壤研究表明, 植被的覆盖度、物种多样性、有机碳、全氮和电导率的平均值随着围封年限的增加呈增加趋势且地统计学分析表明土壤有机碳、全氮、电导率、粘粒含量及 0~20 cm 土壤水分含量的空间异质性在 0~11 年先锋沙地植物向灌丛演替的阶段呈增加趋势而后呈降低趋势。Ren 等^[43]对鹤山丘陵地退化牧场 20 年的自然恢复研究发现, 经过 20 年的恢复, 土壤有机碳、可溶性氮、速效磷和速效钾已经恢复到了顶级群落的水平。

2.2 植被恢复对土壤微生物的影响

土壤微生物在生态系统多样性和功能的恢复过程中扮演着重要角色, 通过对微生物群落的观测和处理能够加速退化生态系统的修复^[44]。由于微生物对外界的胁迫反应比植物和动物敏感^[45], 土壤微生物指标常被用来评价退化生态系统中生物群落与恢复功能之间的联系并能为退化土地恢复提供有用的信息^[46]。植被对微生物的影响主要通过两个途径, 一是通过改变土壤结构和性质来改变微生物的生长环境, 二是通过根系分泌物对微生物区系特别是根系的微生物群落产生影响。土地利用改变和植被的恢复对土壤微生物的影响主要存在于不同的植被类型和不同的恢复年限的影响两大方面。

不同的植物群落、不同植被类型对土壤微生物在土壤中的分布、数量、种类以及微生物的生理活性会产生很大的影响。对草地、林地和农田的土壤微生物多样性的研究表明, 草地和人工林的遗传多样性相近, 而草地、人工林土壤与农田土壤细菌的遗传多样性差异较大^[47]。Hedlund^[48]对弃耕地人工撒播 15 种混合植物种子和自然恢复两种恢复模式的研究发现, 2 年之后, 微生物的群落结构均发生改变, 人工播种的样地细菌菌群增加且显示出高的微生物活性和生物量, AM 真菌的生物量降低。赵吉等^[49]对锡林河流域的 6 种不同植物群落作为研究对象进行了土壤各类群微生物量的测定分析。结果表明, 不同植物群落下微生物的组成及其生物量均有差异, 不仅表现在总生物量上, 而且在不同类群生物量的组成比例上也因不同生境而异。森林恢复类型对土壤微生物生物量碳、细菌数量的影响显著, 均以天然次生林最高, 人工林次之, 而荒地最差; 微生物代谢活性和微生物代谢的多样性指数在不同植被类型之间也有明显差异, 其变化趋势与微生物生物量碳、细菌数量基本一致; 天然次生林土壤微生物群落利用碳源的整体能力和功能多样性比人工林和荒地强; 自然恢复更有利于改善土壤微生物的结构

和功能^[50-51]。韩永伟等^[52]研究了退耕还草对土壤微生物生物量碳、氮的影响, 发现 0~20 cm 土层土壤微生物生物量碳、氮的大小顺序为: 混播草地>单播草地>小麦地; 不同单播处理对土壤 0~20 cm 微生物生物量碳、氮影响明显。邵玉琴等^[53]研究发现恢复草地的土壤微生物生物量均高于退化草地, 并且与土壤肥力密切相关。White 等^[54]研究发现在北方针叶混交林中土壤微生物的功能多样性与树种和恢复途径无关, 而与恢复过程中土壤的 pH 密切相关。对不同林分的研究表明^[55-56], 不同林分下土壤微生物的数量不同, 灌木林>乔木林, 阔叶林>针阔混交林>针叶纯林, 落叶阔叶林>常绿阔叶林。从微生物群落多样性的全球分布格局来看, 土壤微生物群落多样性与覆盖于土壤上的植物群落多样性呈正相关; 从微生物群落多样性的区域格局来看, 土壤微生物群落多样性与覆盖于土壤上的植物群落的生产力和多样性呈正相关。Stephan 等^[57]的研究显示, 在一个实验草原生态系统里, 植物物种丰富度和植物功能多样性对该系统土层里的全部的分解活动和可培养的微生物种群的分解多样性有正面影响。夏北成和 James^[58]的研究表明草地的土壤微生物类群多于乔木和灌木, 土壤微生物类群的多少与植物多样性指数、均匀度、丰富度、优势度呈正相关。土壤细菌的代谢活性和代谢多样性随着植物物种数量的对数和植物功能组的数量而直线上升, 其原因可能是由植被流入土壤的物质和能量的多样性和数量的增加, 也可能是由土壤动物区系引起的生境的多样性的增加造成的^[59]。此外植物的多样性对土壤微生物生物量碳、氮也具有重要影响, 植物多样性的丧失可以导致微生物生物量降低, 因为在大多数陆地生态系统中有有机碳源限制着土壤微生物的活性^[60]。

植被恢复的不同阶段, 微生物的数量和种类都存在明显差异, 植被恢复年限的长短是植被恢复影响土壤微生物的另一个主要因素。植被恢复过程中植物多样性的增加能够对土壤微生物的多样性产生影响, 研究表明, 微生物生物量、呼吸及真菌的丰富度随着植物多样性的增加均呈增加趋势^[61]。对印度东北部不同退耕年限的休耕地的研究发现, 随着退耕年限的增长, 微生物生物量碳和氮均呈增加趋势^[38]。通过对杉木人工林不同发育阶段研究发现: 中龄杉木林细菌数量明显低于幼龄林和成熟林; 放线菌数量的变化均无明显规律; 从幼龄到中龄杉木人工林, 土壤真菌数量呈明显下降趋势, 从中龄林到成熟林, 则呈上升趋势^[62]。Jia 等^[63]研究结果表明次生林土壤微生物

生物量随着恢复年限增加,在17年次生林中达到最高值,而后下降,最后保持在一个比较稳定的水平。薛箴等^[64]研究了黄土丘陵沟壑区侵蚀环境下不同恢复年限刺槐林土壤微生物生物量的演变规律,发现微生物量随恢复年限的增加变化显著,随年限的增加而逐渐增加,在近成熟林和成熟林期基本达到稳定,成熟林后期又开始上升。刘占峰等^[65]对15、25和30年的人工油松林的研究后发现微生物生物量碳、氮随植被恢复年限的增长而增长。周国模和姜培昆^[66]研究发现侵蚀型红壤植被恢复后,土壤微生物生物量碳显著增加,并随着恢复时间的延长不断上升。Gros等^[67]研究了高山草地系统恢复过程中土壤微生物活性与土壤理化性质的关系,发现土壤微生物代谢多样性随恢复年限的增加而增加,并与土壤理化性质的改善密切相关;微生物的代谢均匀度与生态系统功能呈正相关,土壤微生物在植被恢复的初期在功能和活性上很不稳定。Chabrierie等^[68]研究了草地生态系统沿演替梯度植被与土壤微生物在结构和功能上的联系,发现尽管土壤有机质在植被演替的后期比较高,但是土壤微生物生物量和酶活性与灌丛的出现呈负相关,而与草地生境出现呈正相关;微生物指标与其它因子呈现出复杂的相互作用,微生物指标与土壤含水量、可溶性碳和多聚糖成正相关,而与植被生物量和凋落物中的木质素含量成负相关;土壤微生物的功能与植被的恢复梯度不存在显著相关性。

3 结论与展望

植被恢复过程中土壤,植被及地下土壤生物均发生了显著的变化,大部分的研究表明植被恢复过程中土壤的物理化学性质得到了改善,凋落物及根系分泌物也为地下生物提供了更多的营养物质和能源物质使得微生物的生物量和多样性都得以提高,同时,植被恢复对于地上植物物种的恢复和多样性的保护也起到了重要作用。但从现有的研究中也发现,针对植被恢复的生态环境效应,现有的研究多存在研究尺度小,主要集中在样地尺度的研究上;研究深度不够,缺乏机理性的研究等问题,因此,根据现有研究,提出在未来的发展中:

首先,应该增加更多的对比研究,植被恢复过程中自然恢复和人工恢复是两大主要的恢复途径,对于不同的环境条件下,适宜的恢复方式存在差异,尤其对于人工林的恢复,在一些区域还存在很大的争议,例如黄土高原地区退耕还林之后种植的大面积的刺槐人工林,在有些区域生长良好,而在一些区域很容易生长缓慢,形成所谓

的“老头树”,且刺槐在一些研究中发现,种植在一定年限内对水土流失及土壤质量的改善都起到了正作用,而恢复年限超过一定时间后对生态环境就由正效应变成了负效应。因此,对于不同环境下,不同的恢复物种,恢复方式还应该进行更多的对比研究,从而找到最适宜的植被恢复模式。另外,如今对于不同恢复方式的比较大多停留在单一恢复物种及恢复方式的研究上,对不同地区不同的植被搭配模式的研究相对较少,研究表明,不同的植被搭配格局比单一的恢复方式更有利于土壤性质的改善及植物多样性的恢复^[69-70]。因此,在今后植被恢复的研究中,针对不同植被搭配模式下的生态环境效应也应给予更多的关注。

其次,应该增加更多大尺度的研究,现有的研究多集中在样地尺度上,但是很多情况下,小尺度的研究结果并不能直接用来大尺度上的推算。针对植被恢复对地上、地下生态系统产生的影响,这些影响一方面来自于恢复的植被本身,另外还与外界的自然环境因子有很直接的联系,小尺度上与大尺度上的相关影响因子诸如地形、气候存在差异,影响的主导因子也发生改变,小尺度上植物恢复过程中地形因子可能是主要影响因素,而大尺度上温度及水分因子可能又变成了主要影响因素,从而由植被恢复所产生的生态环境效应也将存在很大差别。现有大部分研究认为植被的恢复包括人工林的建设有利于土壤养分的增加,但也有针对全球尺度上人工林的研究发现人工林的种植能够明显降低土壤的养分含量,人工造林降低了6.7%和15%的土壤碳和氮含量,而单一油松林的种植可降低23%的土壤钾含量^[71]。因此,在现有的研究基础上,可以增加更大尺度上的研究,使得在不同尺度上都能够对植被恢复的生态环境效应有更为准确的理解。

再者,地上和地下生态系统存在紧密的联系,对于陆地生态系统中地上地下生物多样性之间的相互影响机理和反馈机制一直以来是土壤学科中关注的热点之一^[72]。以往的研究表明,去除一定的植物物种能够显著影响整个植物群落的动态变化以及对土壤的理化和生物学性质都存在显著影响^[73]。而植被恢复的过程中植物的物种多样性发生的改变与整个植物群落的变化及地下生态系统中土壤的性质的改变之间存在着怎样的联系和相互的反馈机制呢?现有的针对植被恢复的研究就这些方面还缺乏深入的探讨,在未来的研究中应该进行更多机理方面的研究,为更好地阐述植被恢复的生态环境效应及如何更好地进行植被恢复工作的开展提供更多科学依据。

参考文献:

- [1] 温仲明, 焦锋, 卜耀军, 等. 植被恢复重建对环境影响的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 10-15.
- [2] LI W H. Degradation and restoration of forest ecosystems in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 201: 33-41.
- [3] 查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 52-58.
- [4] ZHANG B, YANG Y, ZEPP H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China[J]. *Catena*, 2004, 57: 77-90.
- [5] ZHENG F L. Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau [J]. *Pedosphere*, 2006, 16: 420-427.
- [6] 彭少麟. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 中国基础科学·研究进展, 2001, (3): 18-24.
- [7] 杜国祯, 王刚. 亚高山草甸弃耕地演替群落的种多样性及种间相关分析[J]. 草业科学, 1991, 8 (4): 53-57
- [8] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 等. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究 II 演替系列的群落 α 多样性特征[J]. 生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- [9] 白文娟, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地主要自然恢复植物群落的多样性分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 140-144.
- [10] 赵洪, 向旭, 韦美玉. 都匀退耕地植被恢复初期植物多样性初步研究[J]. 黔南民族师范学院学报, 2005, 6: 79-82.
- [11] ZHANG J, ZHAO H, ZHANG T, et al. Community succession along a chronosequence of vegetation restoration on sand dunes in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(4): 555-566.
- [12] BEKKER R M, VERWEIJ G L, BAKKER J P, et al. Soil seed bank dynamics in hayfield succession [J]. *Ecology*, 2000, 88: 594-607.
- [13] CARLA K, ARNAUD M, JACQUES M. Spontaneous vegetation dynamics and restoration prospects for limestone quarries in Lebanon [J]. *Applied Vegetation Science*, 2003, 6: 199-204.
- [14] NISHIHIRO J, WASHITANI I. Restoration of lakeshore vegetation using sediment seed banks; studies and practices in Lake Kasumigaura, Japan[J]. *Global Environmental Research*, 2007, 11: 171-177.
- [15] MITCHELL R J, MARRS R H, LE DUC M G, et al. A study of the restoration of heathland on successional sites: changes in vegetation and soil chemical properties [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36: 770-783.
- [16] 卜耀军, 温仲明, 焦峰, 等. 黄土丘陵区人工与自然植物群落物种多样性研究-以安塞县为例[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 4-6.
- [17] 王发刚, 王文颖, 陈志, 等. 土地利用变化对高寒草甸植物群落结构及物种多样性的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 58-63.
- [18] 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 等. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1697-1702.
- [19] 张笑培, 杨改河, 王和洲, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复群落特征及多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 22-25.
- [20] 张建, 刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 207-217.
- [21] SHANKAR U, LAMA S D, BAWA K S. Ecosystem reconstruction through 'taungya' plantations following commercial logging of a dry, mixed deciduous forest in Darjeeling Himalaya [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 102: 131-142.
- [22] KIRMER A, MAHN E G. Spontaneous and initiated succession on unvegetated slope sites in the abandoned lignite-mining area of Goitsche, Gemany [J]. *Applied Vegetation Science*, 2001, 4: 19-28.
- [23] KAREL P, SÁNDOR B, CHRIS B J, et al. The role of spontaneous vegetation succession in ecosystem restoration: A perspective [J]. *Applied Vegetation Science*, 2001, 4: 111-114.
- [24] 赵新泉, 马艳娥. 退耕还林的生态作用及实施措施[J]. 林业资源管理, 1999, (3): 36-39.
- [25] PANIAGUA A, KAMMERBAYUER J, AVEDILLO M, et al. Relationship of soil characteristics to vegetation successions on a sequence of degraded and rehabilitated soils in Honduras [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 72: 215-255.
- [26] AN S S, HUANG Y M, ZHENG F L. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41: 286-292.
- [27] FU B J, WANG J, CHEN L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2003, 54 (1-2): 197-213.
- [28] STOLTE J, VAN VENROOIJ, ZHANG B G, et al. Landuse induced spatial heterogeneity of soil hydraulic properties on the Loess Plateau in China. *Catena*, 2003, 54 (1-2): 59-75.
- [29] GONG J, CHEN L D, FU B J, et al. Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2006, 17: 453-465.
- [30] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河, 等. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 414-420.
- [31] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 等. 黄土丘陵区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 17-21.
- [32] 邓仕坚, 张家武, 陈楚莹, 等. 不同树种混交林及其纯林对土壤理化性质影响的研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 126-132.
- [33] JIAO F, WEN Z M, AN S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2011, 86: 110-116.
- [34] CHEN L D, HUANG Z L, GONG J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2007, 70: 200-208.
- [35] 张成娥, 陈小利. 黄土丘陵区不同撂荒年限自然恢复的退化草地土壤养分及酶活性特征. 草地学报, 1997, 5(3): 195-200.
- [36] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [37] ZHU B B, LI Z B, LI P, et al. Soil erodibility, microbial biomass, and physical-chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Research*, 2010, 35(3): 531-541.
- [38] ARUNACHALAM A, PANDEY H N. Ecosystem restoration of jhum fallows in northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients[J]. *Restoration Ecology*, 2003, 11: 168-173.
- [39] 刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 卧龙自然保护区土地利用变化对土壤性质的影响[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 682-687.
- [40] 敖伊敏, 焦燕, 徐柱. 典型草原不同围封年限植被-土壤系统碳氮储量的变化[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1403-1410.
- [41] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648-655.
- [42] ZUO X A, ZHAO X Y, ZHAO H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 318: 153-167.
- [43] REN H, DU W P, WANG J, et al. Natural restoration of degraded rangeland ecosystem in Heshan hilly land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3593-3600
- [44] HARRIS J. Soil microbial communities and restoration ecology: facilitators of followers? [J]. *Science*, 2009, 325: 573-574.
- [45] PANIKOV N S. Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11: 161-176.
- [46] HARRIS J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 801-808.
- [47] 杨官品. 土壤细菌遗传多样性及其植被类型相关性研究[J]. 遗传学报, 2000, 27(3): 278-282.
- [48] HEDLUND K. Soil microbial community structure in relation to vegetation management on former agricultural land [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1299-1307.
- [49] 赵吉, 廖仰南, 张桂枝, 等. 草原生态系统的土壤微生物生态[J]. 中国草地, 1999, 3: 57-67.
- [50] 郑华, 欧阳志云, 方治国, 等. BIOLOG 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 456-461.
- [51] ZHENG F L, HE X B, GAO X T, et al. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 108: 85-97.

- [52] 韩永伟, 韩建国, 王 垫, 等. 农牧交错带退耕还草对土壤微生物量 C、N 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 993-997.
- [53] 邵玉琴, 敖晓兰, 宋国宝, 等. 皇甫川流域退化草地和恢复草地土壤微生物生物量的研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 578-580.
- [54] WHITE C, TARDIF J C, ADKINS A, et al. Functional diversity of microbial communities in the mixed boreal plain forest of central Canada [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1359-1372.
- [55] 蔡艳, 薛泉宏, 侯琳, 等. 黄土高原几种乔灌木根区土壤微生物区系研究[J]. 陕西林业科技, 2002, 1: 4-9.
- [56] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 280-285.
- [57] STEPHAN A, MEYER A H, SCHMID B. Plant diversity affects culturable soil bacteria in experimental grassland communities [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 22: 988-998.
- [58] 夏北成, ZHOU J, JAMES M T. 植被对土壤微生物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 296-300.
- [59] WARDLE D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. *Biological Reviews*, 1992, 67: 321-358.
- [60] 肖辉杯, 郑习健. 植物多样性对土壤微生物的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 238-241.
- [61] ZAK D R, HOLMES W E, WHITE D C, et al. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? [J]. *Ecology*, 2003, 84(8): 2042-2050.
- [62] 焦如珍, 杨承栋, 孙启武, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化[J]. 林业科学, 2005, 4(6): 163-165.
- [63] JIA G M, CAO J, WANG C Y, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, Northwest China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217: 117-125.
- [64] 薛窠, 刘国彬, 戴全厚, 等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林 (*Robinia Pseudoacacia*) 土壤微生物量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 909-917.
- [65] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 等. 人工油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1012-1019.
- [66] 周国模, 姜培昆. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 68-70.
- [67] GROS R, MONROZIER L J, BARTOLI F, et al. Relationships between soil physicochemical properties and microbial activity along a restoration chronosequence of alpine grasslands following ski run construction [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27: 7-22.
- [68] CHABRERIE O, LAVAL K, PUGET P, et al. Relationship between plant and soil microbial communities along a successional gradient in chalk grassland in north-western France [J]. *Applied soil ecology*, 2003, 24: 43-56.
- [69] HU C J, FU B J, LIU G H, et al. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau [J], China, *Journal of Soil and Sediments*, 2010, 10: 1082-1091.
- [70] 王志云, 陆耀东, 温达志, 等. 不同植被恢复模式对生物多样性及土壤有机质的影响[J]. 中国城市林业, 2009, 7(5): 45-47.
- [71] BERTHRONG S T. The effect of afforestation on soil microbes and biogeochemistry across multiple scales [D]. Durham, North Carolina: University program in ecology duke university, 2009.
- [72] HOOPER D U, BIGNELL D E, BROWN V K, et al. Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks [J]. *Bioscience*, 2000, 50(12): 1049-1061.
- [73] WARDLE D A, BONNER K I, BAKER G M, et al. Plant removals in perennial grassland: vegetation dynamics, decomposers, soil biodiversity, and ecosystem properties [J]. *Ecological Monographs*, 1999, 69(4): 535-568.

Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration

HU Chanjuan^{1,2}, GUO Lei¹

1. Institute of Geographical Sciences, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Vegetation plays an important role in soil and water conservation, carbon sequestration process in ecosystem. Vegetation restoration always use ecological principle to restore biological diversity and ecosystem function through existed vegetation protection, forest enclosure, artificial vegetation (forest, shrubbery and grass) planting and rehabilitation or reconstruction of destructed forests. Nowadays, Natural and artificial restoration of vegetation is considered as one of the most effective approaches to improve ecosystem health. Vegetation can greatly influence above-ground plant community structure and diversity during restoration process. Meanwhile, it can impact the properties of the below-ground ecosystem via enhancing litter and root input; increasing soil nutrients accumulation, improve soil physical structure and enhancing soil microbial biomass and activity during vegetation restoration process. This paper reviewed the effects of vegetation types and restoration times on plant community composition and diversity, soil physicochemical properties and soil microbial community during natural and artificial vegetation restoration. Both natural and artificial vegetation restoration could increase plant diversity. The composition of plant community is different on different restoration stages and the diversity would increase as restoration time increasing. However, unreasonable artificial vegetation restoration under specific environments would induce vegetation degradation and plant diversity decreasing. Different vegetation types have different impacts on soil physicochemical and microbial properties because of their different growth patterns. As restoration time increasing, soil physicochemical and microbial properties show an initial increasing at early stage and reach a stable status at late stage. According to the previous researches about vegetation restoration, we advised that more attention should be paid on comparative studies to investigate the effects of environmental condition, vegetation species and restoration approach during vegetation restoration processes in the future. In addition, the effects of vegetation restoration should be examined in larger spatial scale considering most existed studies were conducted in local scale. Finally, since the above and below ground linkages and behind mechanisms have become important issues in soil science research, such conception should be incorporated into the researches about effects of vegetation restoration.

Key words: vegetation restoration; soil nutrient; soil microbial organism; plant diversity