

矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展^①

张兆彤¹, 王金满^{1, 2*}, 张佳瑞¹

(1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要: 土壤与植被作为煤矿区土地复垦主要成员, 在生态恢复与重建方面扮演着重要角色。同时, 土壤与植被之间存在着密切的交互影响关系, 认识土壤与植被恢复间的交互影响关系及其作用规律与机理对土地复垦与生态恢复具有重要意义。本文系统梳理了复垦土壤与植被演替规律、交互影响研究方法以及交互影响机理。发现研究方法多为缺乏创新性的线性方法, 且未能做到对植被与土壤交互影响的连续、动态研究和全面综合分析。在此基础上, 提出了深入研究方向: 创新植被与土壤交互影响的方法, 加强植被与土壤交互影响的动态分析, 强化交互影响机理的综合研究, 以为土地复垦与生态恢复研究提供新的视角。

关键词: 土地复垦; 土壤; 植被; 交互影响机理

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A

中国是以煤为主要能源的国家, 是全世界最大的煤炭生产国和消费国, 2014 年煤炭产量达到 4.3 Gt, 且煤炭消费量占一次性能源总量的 74%^[1]。煤矿开采在给地区经济发展带来巨大财富的同时, 会破坏矿区生态环境, 使土壤结构、地形地貌、景观生态和生物群落等环境要素发生不可逆的变化^[2]。改善煤矿区生态系统的主要途径是进行土地复垦和生态修复, 其中的重要环节是土壤重构与植被重建。植被的重建过程会改善土壤的水肥状况, 土壤的重构也会促进植被的生长发育, 土壤-植被复合系统会改善煤矿区环境, 促进土地复垦与生态修复。研究土壤与植被之间交互影响关系的作用规律与机理会为煤矿区土地复垦提供理论依据与技术支持。

目前, 国内外学者对煤矿区植被与土壤的交互影响进行了一系列研究, 取得了丰硕成果, 但依然存在许多问题。首先, 植被与土壤交互影响的方法有待创新。国内外学者多采用的是线性分析方法, 原理简单、计算方便、可操作性强, 但缺乏创新性, 未能从系统的角度全面深入地分析土壤与植被交互影响的机理; 其次, 植被与土壤交互影响的动态分析研究有待加强, 选取的数据都是短时期内的, 忽略了植被与土壤的交互影响是不断发生变化的, 未能做到连续、动态研究; 再者, 植被与土壤交互影响机理的综合研究有

待促进。学者在分析交互影响机理时, 多数是将物理、化学、生物性质割裂开来分析, 未能做到全面、综合地分析。

鉴于此, 本文通过文献综述与系统总结, 深入剖析了当前土壤与植被交互影响方面的重要研究进展、存在的不足和突出问题。以期能引起更多学者对此研究的持续关注和思考, 籍以推动相关研究的深入发展, 为复垦矿区的植被重建、土壤重构以及生态恢复提供科学依据。

1 矿区复垦土壤与植被的演替规律

1.1 植被演替规律

植物群落的演替是恢复植被对土壤不断适应与改造的过程, 同时也是不同物种在土壤水分和养分等资源下相竞争和替代的过程^[3]。矿区的植被演替分为自然演替和人工演替, 自然演替是一个非常缓慢的过程, 在自然演替过程中, 施加人工复垦措施, 可以缩短植被演替的周期, 提高植被演替的速率^[4]。随着复垦年限的增长, 煤矿区复垦植被的种类、数量、蓄积量、生物量、平均高度均有所增加, 植被覆盖率上升^[5], 生长状况也有明显的改善^[6]。

1.1.1 植被演替驱动因素 众多学者对植被演替的驱动因素做了一系列的研究, 包括非生物因素、气

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271528)资助。

* 通讯作者(wangjinman2002@163.com)

作者简介: 张兆彤(1994—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: zhangzhaotong1994@163.com

候因素、人为干扰、邻近繁殖体以及生物因素等。发现植被的演替是多种因素综合作用的结果,在不同的演替阶段,驱动因素也不同。演替初期,主要是非生物因素作为驱动因素^[7],此时,土壤 pH 较高,土壤肥力较差^[8],N、P、有机质缺乏制约了植被的生长发育^[9],煤矿区初始环境条件的优劣会决定植物群落的多样性和组成结构^[10],并且煤矿区植物群落最初的物种组成也会影响植被演替的进程^[11]。在演替中期,气候因素^[12]、人为干扰^[13]以及邻近区域自然繁殖体^[14]影响着植被演替的方向和速率。气候条件通过影响降水和温度来影响植被的生长发育,从而影响演替速率;良性的人为干扰会加速植被演替过程的进行,而不良的人为干扰会阻碍植被演替过程的进行,严重的甚至可能会使植被出现反向演替;邻近区域的繁殖体会通过外力的扩散作用传播到复垦区进行繁殖,对植被的数量和种类产生影响。演替后期,由于群落中的物种多样性增加,种间斗争和种内竞争变得更加激烈,生物因素成为主要的驱动力^[15]。

1.1.2 植物群落演替阶段 在演替过程中,植物群落朝着顶级群落演替,结构和功能会发生相应的变化,群落高度逐渐增加,层次分化越来越明显,物种的组成由单一型转向复杂型,物种丰富度增加^[16],最终形成的顶级群落是多物种共生、结构和功能稳定、能够抵御恶劣环境变化的植物群落^[17]。国内外学者根据不同的划分规则与方法,将植物群落的演替过程分为不同的阶段。第一种分类方法是根据群落中优势种的种类进行划分。张晓薇^[18]将植物群落的演替分为次生裸地-草丛群落-灌丛群落-森林群落 4 个阶段。对比来说,许佐民等^[19]更加详细地划分为裸地-草丛-灌丛-针叶林-落叶阔叶混交林-针阔叶混交林,最终达到中生性的顶级群落 7 个阶段。第二种分类方法是根据物种组成和物种多样性来进行划分。Novak 等^[20]认为复垦 1~4 年的植被主要以一、二年生植物为主,复垦年限 5~10 年植被主要以多年生草本植物为主,复垦 10~25 年开始出现灌木,复垦 25 年以上形成了草本-灌木-乔木组合的复垦生态景观,且乔木的数量最多。王琼等^[21]将煤矿区复垦植被的演替分为初级演替期、初级交替期、高级交替期、高速恢复期、恢复稳定期 5 个阶段。而郝蓉等^[22]认为复垦植被的演替过程应该分为物种组成单一、物种组成丰富、物种组成较稳定 3 个阶段。

总之,植物群落演替是一个漫长而复杂的过程,演替的不同阶段受到不同因素的驱动,不断朝着顶级植物群落的方向演替,与原来的群落在各个方面的相

似度都由低变高,生态结构和生态功能逐渐趋于稳定。

1.2 土壤演替规律

1.2.1 土壤物理性质演替 在演替过程中,土壤物理性质得到改善。由于植被根系的穿插作用以及土壤质地状况的改善,使得土壤的孔隙度增加^[23],而土壤容重减小,并且后期土壤容重的分布更加均匀^[24]。地表植被的作用使得土壤的持水性能增加,且土壤孔隙度增加导致土壤对水分的渗透性增强,因此土壤的含水量呈上升趋势^[25]。此外土壤电导率和土壤体积分质量均随着复垦年限的延长而减小,土壤电导率减小说明土壤中水溶性盐的含量降低,盐分状况得到改善;土壤体积分质量减小说明土壤紧实度和土壤肥力状况发生了变化^[26]。

1.2.2 土壤化学性质演替 随着煤矿区复垦工作的进行,土壤的肥力逐渐增强。土壤 pH 降低,但是变化不明显,土壤有机质、N、P、K 的含量均呈现增加趋势^[27]。在演替过程中,随着植被恢复,凋落物的数量增多,经过微生物分解,土壤有机质增多,土壤肥力提高,并且伴随着土壤微生物的活动,产生更多的有机酸,使得演替初期呈现碱性的土壤 pH 逐渐降低^[28]。由于受到耕作、植物固氮作用、人工施肥的影响较大,土壤的全氮、碱解氮增多,复垦初期全氮的变化速率比较快,后期速率逐渐变慢,并接近原地貌的含量^[29]。土壤全磷、全钾、有效磷、速效钾含量也增多^[30],一方面是因为在复垦过程中,人为施加磷肥和钾肥,另一方面是因为植被的凋落物进入土壤带来了 P、K 元素,且土壤对 P、K 的吸附、解吸以及固定能力得以提高。

1.2.3 土壤生物性质演替 土壤微生物群落结构随植被自然恢复而演替,随着复垦的进行,土壤微生物总量、种类以及微生物群落的多样性逐渐增加,土壤酶的活性逐渐增强。于森等^[31]认为随着复垦年限的延长,土壤中的微生物数量、根系真菌菌株数量、根系真菌多样性指数逐年递增。Fresquez 等^[32]的研究也验证了真菌数量和多样性随着复垦年限增加而逐年递增的演替规律。Baldrian 等^[33]发现,在同一土层中,修复地土壤酶的活性和土壤微生物量显著高于未复垦地。王翔等^[34]研究发现较未复垦地来说,复垦地的土壤蔗糖酶活性提高了 31%,过氧化氢酶的活性提高了 61%,土壤脲酶的活性提高了 100%,而土壤多酚氧化酶的活性变化最明显,提高了 117%。

总之,复垦初期,土壤黏重板结,导致土壤的容重较大,孔隙度较小,总体质量状况很差,微生物总量较少,土壤酶活性较低。但是随着复垦年限的增加,

土壤的水分状况、养分状况有所改善,保水性能逐渐增强,通气状况逐渐变好,土壤肥力逐渐增强,土壤微生物种类和数量增多,酶活性增强。

2 复垦土壤与植被交互影响方法研究

此前学者在研究植被群落与环境因子之间的相互关系时,多使用的是线性回归、计算相关系数

或者进行单因子描述的方法,这些研究并未将各类影响因素综合起来探讨,不明确多因子之间相互作用的程度。而选取土壤与植被的多个因子进行多元分析,来研究植被与土壤之间的耦合关系是比较准确的,因此本文主要探讨的是几种多元分析的方法。植被与土壤交互影响的研究方法优缺点对比情况见表 1。

表 1 复垦土壤与植被交互影响的研究方法比较
Table 1 Comparison of research methods on interaction between reclaimed soil and vegetation

方法类型	优点	缺点	参考文献
多元线性回归	简单、方便,可操作性强,准确地计量各个因素之间的相关程度与拟合程度的高低,具有较好的数据拟合能力	要求样本足够大,服从典型概率分布;忽略了交互效应和非线性的因果关系,不能全面深入地反映变量间内部更加复杂的影响原理	[35-36]
灰色关联分析	原理简单、易于掌握、计算简便、排序明确、客观性强、对样本量无过高要求,不需要典型的分布规律	不满足无量纲化处理的保序效应,概念不明确,规范性内涵不全面;各模型不具有规范性和一致性,不能体现负相关	[37-38]
梯度分析方法	清晰、直观,精度高,可检验不显著的因子,能同时结合多个因子,生态意义明确	不能从系统的角度出发,全面、深入地进行分析,只是割裂地分析了各指标间的关系	[39-40]
典型相关分析	通过提取主成分来减少研究变量个数,简化两组变量间的复杂相关关系,揭示两组变量之间的内部联系	不能及时、准确地反映样本数据的时间特征及变化趋势;无法全面描述时间序列的特征,无法体现相关性大小的顺序	[41-42]

2.1 多元线性回归

多元线性回归,是利用数理统计中回归分析,来确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法^[43]。许多研究者在进行多元线性回归之后,会建立耦合模型或者线性回归模型来更加明确地对交互影响关系进行分析。徐明等^[44]选取了 9 个植被因子和 11 个土壤因子,对它们之间的相关性进行线性拟合,并且构建了植被-土壤系统耦合协调模型。Prach 等^[13]通过多元线性回归模型对植被特征与气候和土壤变量之间的相关关系进行表述。也有学者在进行植被与土壤之间的交互影响关系分析时借助其他的方法,例如通径分析、Spearman 秩相关分析和主成分分析。杜峰等^[45]结合多元回归和通径分析法分析了草地群落生物量及植被土壤养分效应,明确植被演替过程中植被与土壤的互动效应。文海燕等^[46]在研究退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关性时,结合 Spearman 秩相关分析和回归分析描述草本植物与土壤性状、草本植物与灌木的关系。Alday 等^[47]结合了多元线性回归以及主成分分析的方法来探究地中海气候的复垦煤矿中土壤变量与植被结构和植被组成变化之间的相关性。

多元线性回归的方法可以分析出土壤与植被之间是否存在交互影响,得到正负相关性以及相关

性大小的结论。但是不能全面深入地反映变量间内部更加复杂的影响原理,并且要求样本数量足够大,服从典型概率分布,应用虽然广泛,但是具有很大的局限性。

2.2 灰色关联分析

灰色关联分析是对一个系统发展变化态势进行定量描述和比较的方法,在动态历程分析方面有较大优势^[48]。在进行相关分析时,由于自然条件以及人类自身条件等的局限性,许多因素之间的关系是处于已知与未知之间,即为灰色的,很难精确地度量相关程度的客观大小,在此情况下可以选择灰色关联分析。在一定程度上弥补了线性回归分析的缺陷,对样本量的多少和有无规律都同样适用^[49]。黄文娟等^[50]通过计算植被活根量与土壤理化性质的灰色关联系数,来反映土壤理化因子对群落地下生物量的影响,并指出了影响植物地下生物量形成的促进和限制因子。卢纪元^[51]在探讨植物群落结构特征与微地形土壤养分的耦合关系特点时运用到了灰色关联分析方法,发现植物群落结构与土壤养分的耦合关系会因微地形不同而产生差异性。薛鸥等^[52]运用灰色关联度构建植被-土壤耦合模型来探究植物群落多样性与土壤因子的耦合关系。

灰色关联分析对样本要求较低,但是它也具有有一

定的局限性,在分析过程中,分为参考数列与比较数列,每一组实验只分析了比较数列对参考数列的影响,并不能体现交互影响,并且不满足无量纲化处理的保序效应,不能体现负相关。

2.3 梯度分析方法

梯度分析方法也叫排序方法,是将样方或者植物种排列在一定的空间,使排序轴能够反映一定的生态梯度,从而解释植被或植物种的分布以及与环境因子之间的关系^[40]。梯度分析方法一般用来分析植物群落与环境因子之间的相互关系,也有研究将其应用到植被与土壤的交互影响之中。主要使用到的方法有降趋势对应分析(DCA)、典范对应分析(CCA)和降趋势典范对应分析(DCCA)。DCA 主要应用于分析群落之间的关系,而 CCA 和 DCCA 主要用于揭示物种与环境的关系,DCCA 是分析植被-环境关系最先进的多元分析技术,可以有效地消除“弓形效应”^[53]。Frouz 等^[54]应用了 TWINSpan、CCA 方法来研究捷克西部 Sokolov 煤矿的植被群落与土壤发育,发现它们在复垦的 25 a 内经历了重大变化,且这种变化是相互关联的。Jeloudar 等^[55]在研究伊朗矿区的植被与土壤的相关关系时应用到了 TWINSpan、CCA、DCA 方法。王洪丹等^[56]在研究黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响时,应用到了 DCA 排序与冗余分析,并得出了植被与土壤因子之间有显著的相关性,而与地形因子之间的相关性不明显的结论。

2.4 典型相关分析

典型相关分析是利用综合变量对之间的相关关系来反映两组指标之间的整体相关性的多元统计分析方法^[57]。国内外学者将典型相关分析应用于研究植被与土壤之间的相关关系,主要是结合主成分分析、聚类分析一起来进行研究分析。运用聚类分析对生态系统进行归类,以此来分析植被与土壤的演替规律;运用典型相关分析来揭示土壤与植被间交互影响的机理以及耦合协同关系;运用主成分分析来确定在交互影响中起主导作用的因素。谭秋锦^[58]结合了这 3 种方法来研究不同生态系统植被与土壤的耦合关系,揭示了生态系统的演替规律与机制。彭晚霞等^[59]选取代表木本植物群落、土壤性质和地形因子的 22 个指标,对其总体特征及三者之间的相互关系进行了经典统计分析、主成分分析、聚类分析与典型相关分析。韩美荣^[60]和和丽萍^[61]在研究中也把主成分分析和典型相关分析结合起来使用。

典型相关分析是借助了主成分分析的思想来进行降维,简化复杂的相关关系。虽然该方法应用比较

广泛,但还是有缺陷存在,它将每组变量作为一个整体来进行研究,并没有研究整体内部的各个变量,并且无法反映时间特征和变化趋势。

3 复垦土壤与植被交互影响机理

3.1 复垦土壤对植被的影响

土壤是植被生长发育的基础,能够不断地为植被提供营养物质和水分^[3],并且土壤动物与土壤微生物共同参与营养物质循环,加快土壤有机物的分解,促进土壤腐殖质的转化,调节土壤肥力,进而影响植被的生长发育^[62]。土壤养分影响着植物器官的生长发育,调节植物对水、热、气的需求,在植被的演替过程中起到至关重要的作用。土壤养分的种类、组成和数量都影响着植被的生长发育,其中土壤有机质、N、P、K 等是植物生长发育的必需元素,其含量与分布影响着植物的生长状态^[63]。Fernandez^[64]指出土壤中 C、N 的积累速率对植物群落结构物种组成产生影响。Sainju 和 Good^[65]研究发现植被根系的密度与土壤的有机质、总氮、水溶性磷以及可交换性阳离子呈正相关,与土壤 pH 呈负相关。Pu 等^[66]认为植被的根系形态与发育状况与土壤中养分的分布以及营养物质的配置密切相关。

土壤中的水分是植被生长发育所需要水分的直接来源,由于我国的煤矿区大部分位于干旱、半干旱地区,所以水分成为制约矿区植被恢复的重要因素^[67]。土壤水分的垂直分布影响植被对水分的利用,土壤水分变异系数和土壤有效水分参数直接影响到植被的生长状况^[6]。土壤含水量不仅影响根系生物量,还会影响到植物群落的生产力,并且限制了植物的蒸腾作用与光合作用。一定的土壤持水量范围内,随着土壤持水量的降低,幼树光合和蒸腾速率逐渐减弱^[68]。

土壤微生物对植被的凋落物进行分解,增加土壤的肥力,能够促进土壤有机质的矿化作用和植物营养元素的转化与供给,从而促进植被的生长。并且可以进行生物固氮,增加土壤中有效氮的来源,供植物吸收利用。Burd 等^[69]发现土壤微生物可以增加植物幼苗的存活率以及植物的地上生物量。土壤中的微生物尤其是菌根的形成能够对植物的根系活动起到促进作用,菌根的协同作用提高了植物群落次生演替的速率,保护了生物多样性,使得植被恢复的效果最优。Hetrick 等^[70]认为菌根能够通过改善土壤结构以及产生营养物质来促进煤矿区植被的恢复与重建。

3.2 复垦植被对土壤的影响

3.2.1 植被对土壤理化性质的影响

首先,植被恢

复过程会有效地改善土壤的持水性以及孔隙状况,减小土壤容重,提高了土壤的稳定入渗效率,植被的直接穿插作用与凋落物的间接保护作用使得土壤的结构稳定性增加,从而改善了土壤质地。有研究表明,土壤的入渗率取决于粉粒含量、植被覆盖度、土壤体积分密度的变化^[71]。Morenode 等^[72]认为地表径流量和径流系数随着植被覆盖度上升呈指数下降,植被覆盖度可以提高土壤的稳定入渗率。Mariano 等^[73]在研究西班牙的 Teruel 煤矿时发现,土壤侵蚀速率会随着植被覆盖率的增长而急剧下降。张圆圆等^[74]研究发现植被恢复以及植物群落的演替过程会改变土壤的空间异质性,会改善土壤的理化性质。单长卷等^[75]认为植被根系分布范围影响土壤水分的量,根系分布深度决定植物拥有营养空间的大小以及对土壤水分和养分吸收利用的能力。其次,植被在凋落之后会形成枯枝落叶,里面含有大量的营养元素,土壤微生物作为分解者将凋落物进行分解,形成腐殖质,将营养元素归还到土壤中,使土壤肥力提高。并且植被的根系通过向土壤中分泌如氨基酸、维生素、有机酸的各种物质来增加土壤中的养分含量。Min 和 Kim^[76]在研究韩国西海岸的复垦矿区时发现,植被的物种丰富度和生物量会影响土壤有机质含量。Burisch 等^[77]认为固氮植物的空间根和结节分布对土壤氮含量产生影响,根密度和结节密度越高,土壤氮含量越高。霍峰等^[78]研究发现随着植被覆盖率的增加,土壤中的全氮和有机质含量呈上升趋势,水解氮、有效磷、速效

钾含量和 pH 呈下降趋势。Parrotta 等^[79]研究发现, 植被恢复能促进土壤结构和肥力的恢复, 继而促进整个生态系统结构和功能的恢复。

3.2.2 植被对土壤生物指标的影响 首先, 植被多样性与根系真菌多样性、真菌数量、微生物总量呈显著正相关, 植被在恢复过程中能够有效地改善土壤的持水性以及孔隙状况, 为土壤中的各种微生物提供了必要的生存生长条件。植被覆盖密度和多样性对土壤微生物活性产生影响^[80], 且植物根系分泌的氨基酸、维生素、胞外酶等物质会影响微生物的数量和多样性, 并且促进微生物对土壤中营养物质的转化与吸收^[81]。植物的凋落物会增加土壤有机质含量, 改善土壤微环境, 为土壤微生物活动提供物质基础^[82], 进而影响土壤微生物群落的形成^[83]。其次, 植被恢复过程中, 植被的凋落物以及根系分泌物会影响土壤中酶的活性^[84], 且土壤酶活性与土壤养分和土壤容重存在不同程度的相关关系^[85]。土壤中的酶主要参与土壤中各种有机质的分解、合成与转化, 以及无机物质的氧化与还原等过程^[86], 植被恢复使得土壤中有机物的含量增加, 土壤酶会更多地参与到有机质转化的过程中, 从而提高了其活性。再者, 土壤 pH 影响土壤微生物的群落结构和功能, 土壤中的重金属含量抑制微生物的生长及活性, 土壤营养状况对微生物活性具有促进作用, 植被通过影响土壤 pH、重金属含量、营养状况对土壤微生物产生作用^[87]。

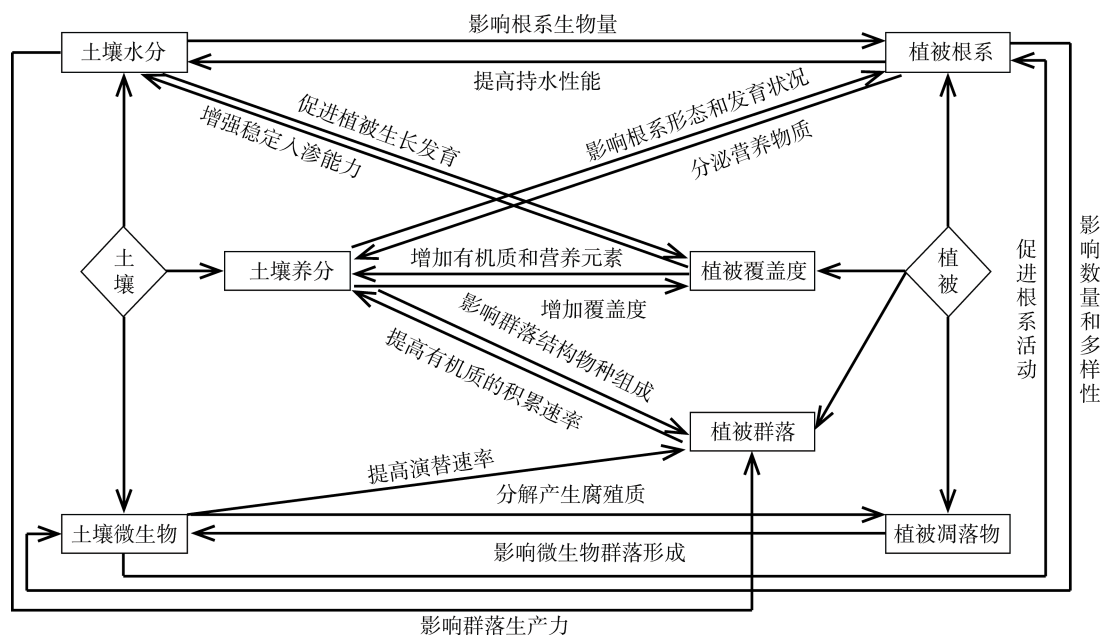


图 1 复垦植被与土壤交互影响的逻辑关系图

Fig. 1 Logic relation diagram of interaction between reclaimed soil and vegetation

4 总结与展望

为有效合理地开展煤矿区的生态恢复与重建工作,对土壤与植被交互影响的研究尤其重要。本文通过系统综述土壤与植被的演替规律、交互影响的研究方法以及交互影响的机理,发现当前研究存在一些问题:植被与土壤交互影响的研究主要选取的是简单的线性方法,缺乏创新性,同时缺少对植被与土壤交互影响的动态分析和综合研究,故提出在此领域未来的研究重点为:

1) 创新植被与土壤交互影响的方法。目前专家在研究复垦区的土壤与植被交互影响的关系时多采用多元线性回归方法、灰色关联度分析方法、典型相关分析方法和梯度分析方法等线性分析方法,此类方法都比较简单,缺乏创新型,并且将土壤与植被的各因素割裂开来分析,未从系统的角度全面深入地分析交互影响的机理。所以,应该加强植被与土壤交互影响研究方法的创新研究,例如复杂网络的方法,建立土壤与植被交互影响的复杂网络模型,并通过对网络的各个指标分析来阐述土壤与植被交互影响的作用机理。

2) 加强植被与土壤交互影响的动态分析。多数学者在进行植被与土壤交互影响的研究时,所选取的数据是短期内的数据,但植被与土壤不断进行演替的,交互影响关系也不断发生变化,故其分析结果具有一定局限性。所以不能片面地只分析某个时间点或者很短的时间段内的相关关系,要注重连续、动态的研究,要对植被与土壤交互影响实行动态监测。

3) 强化植被与土壤交互影响机理的综合研究。目前,在分析植被与土壤的交互影响机理时,一部分学者是从土壤的物理和化学性质的角度研究,另一部分主要是从土壤的生物学指标研究,这样分析得出的结果不够全面,所以应该综合物理、化学、生物性质,并且还要结合政治、经济、人文诸要素更深入全面地研究植被与土壤的交互响应机理。

参考文献:

[1] 王平,王金满,秦倩,等.黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):297-304
[2] 祝宇成,王金满,白中科,等.采煤塌陷对土壤理化性质影响的研究进展[J].土壤,2016,48(1):22-28
[3] 赵冰清.半干旱区露天矿生态复垦土壤养分与植物群落相关分析[D].山西:山西大学,2014
[4] Zhang L, Wang J, Bai Z, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. Catena, 2015, 128: 44-53

[5] Kirmer A, Mahn E G. Spontaneous and initiated succession on unvegetated slopes in the abandoned lignite-mining area of Goitsche, Germany[J]. Applied Vegetation Science, 2001, 4(1): 19-27
[6] Żolnierz L, Weber J, Gilewska M, et al. The spontaneous development of understory vegetation on reclaimed and afforested post-mine excavation filled with fly ash[J]. Catena, 2015, 136: 84-90
[7] 潘德成,齐鹏春,吴祥云,等.半干旱地区煤矿次生裸地植被演替规律应用[J].辽宁工程技术大学学报,2013(4):505-508
[8] 杨振意,薛立,许建新.采石场废弃地的生态重建研究进展[J].生态学报,2012,32(16):5264-5274
[9] Costigan P A, Bradshaw A D, Gemmell R P. The Reclamation of acidic colliery spoil. I. Acid production potential[J]. Journal of Applied Ecology, 1981, 18(3): 865
[10] Dancer W S, Handley J F, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation in kaolin mining wastes in cornwall I. Natural communities[J]. Plant and Soil, 1977, 48(1): 303-314
[11] Cayuela L, Benayas J M R, Maestre F T, et al. Early environments drive diversity and floristic composition in Mediterranean old fields: Insights from a long-term experiment[J]. Acta Oecologica, 2008, 34(3): 311-321
[12] Mudrák O, Doležal J, Frouz J. Initial species composition predicts the progress in the spontaneous succession on post-mining sites[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 665-670
[13] Prach K, Pyšek P, Jarošík V. Climate and pH as determinants of vegetation succession in Central European man-made habitats[J]. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(5): 701-710
[14] Kopeć D, Zajac I, Halladina-browska A. The influence of surrounding vegetation on the flora of post-mining area[J]. Biodiversity Research & Conservation, 2011, 24(dec): 29-38
[15] Heras M D L, Nicolau J M, Espigares T. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(2): 168-178
[16] Banerjee S K, Mishra T K, Singh A K. Restoration and reconstruction of coal mine spoils: An assessment of time prediction for total ecosystem development[J]. Advances in Forestry Research in India, 2000: 1-28
[17] 王蓉,康萨如拉,牛建明,等.草原区露天煤矿复垦恢复过程中植物多样性动态——以伊敏矿区为例[J].内蒙古大学学报(自然版),2013(6):597-606
[18] 张晓薇.半干旱地区矿区废弃地土壤与植被演化规律研究[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2006
[19] 许佐民,毛敬国,高岩.试论铁岭市矿区生态修复途径[J].水土保持应用技术,2004(6):35-36
[20] Novák J, Prach K. Vegetation succession in basalt quarries: Pattern on a landscape scale[J]. Applied Vegetation Science, 2003, 6(2): 111-116

- [21] 王琼, 辜再元, 史春华, 等. 废弃采石场植被自然恢复过程中物种多样性变化特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(11): 1305–1311
- [22] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1470–1476
- [23] Asensio V, Vega F A, Andrade M L, et al. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils[J]. Chemosphere, 2013, 90(2): 603
- [24] 宁方文. 鸡西市柳毛石墨矿废弃地植被恢复及土壤特性研究[D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2007
- [25] 樊文华, 李慧峰, 白中科. 黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化——以平朔安太堡露天煤矿为例[J]. 山西农业大学学报自然科学版, 2006, 26(4): 313–316
- [26] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 229–235
- [27] Cudlín O, Řehák Z, Cudlín P. Development of soil characteristics and plant communities on reclaimed and unreclaimed spoil heaps after coal mining[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016: 052030
- [28] 牛星, 高永, 齐雅静, 等. 伊敏露天煤矿内排土场土壤特征及其肥力评价[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2012(Z1): 97–101
- [29] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223–232
- [30] Lei H, Peng Z, Hu Y, et al. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines[J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 638–646
- [31] 于淼, 毕银丽, 张翠青. 菌根与根瘤菌联合应用对复垦矿区根际土壤环境的改良后效[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 242–248
- [32] Fresquez P R, Sabey B R. Microbial community in the rhizosphere of native plant species growing on reclaimed coal mine soils varying in age[J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 1989, 3(3): 369–384
- [33] Baldrian P, Trögl J, Frouz J, et al. Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(9): 2107–2115
- [34] 王翔, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3601–3606
- [35] 封铁英, 王毅敏, 段兴民. 企业资本结构及其影响因素的关系研究——多元线性回归模型与神经网络模型的应用[J]. 系统工程, 2005, 23(1): 42–48
- [36] 薛素静, 上官同英. 多元线性回归算法的研究和应用[J]. 华电技术, 2007, 29(5): 59–60
- [37] 陈宝平. 灰色关联分析法在产品成本因素分析中的应用[J]. 电子科技, 2012, 25(5): 145–147
- [38] 郭建博. 三种灰色关联度分析法比较研究[J]. 科技信息: 学术版, 2008(1): 4–6
- [39] 邱扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用[J]. 生态学报, 2000, 1(2): 199–206
- [40] 王理德. 民勤退耕区次生草地植被及土壤系统演变研究[D]. 甘肃: 甘肃农业大学, 2016
- [41] 李光泽. 典型相关分析及其在外语教育研究中的应用[J]. 重庆理工大学学报: 社会科学版, 2012, 26(3): 113–119
- [42] 李雪, 林和平, 李迎斌. 灰典型相关分析研究与应用[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6): 121–125
- [43] 姚成. 线性回归模型在产品延伸中的应用[J]. 现代企业文化, 2013(8): 149–151
- [44] 徐明, 张健, 刘国彬, 等. 不同植被恢复模式沟谷地植被-土壤系统耦合关系评价[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2137–2146
- [45] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1673–1683
- [46] 文海燕, 赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 76–80
- [47] Alday J G, Marrs R H, Martínez-Ruiz C. Soil and vegetation development during early succession on restored coal wastes: A six-year permanent plot study[J]. Plant & Soil, 2012, 353(1/2): 305–320
- [48] 张莎. 灰色关联分析新算法研究及其意义[D]. 吉林: 东北师范大学, 2012
- [49] 陈宝平. 灰色关联分析法在产品成本因素分析中的应用[J]. 电子科技, 2012, 25(5): 145–147
- [50] 黄文娟, 于海多, 赵兰坡. 松嫩羊草草原植被与土壤的耦合关系[J]. 草地学报, 2006, 14(1): 62–66
- [51] 卢纪元. 陕北植物群落结构与微地形土壤养分耦合关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016
- [52] 薛鸥, 魏天兴, 刘飞, 等. 公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 91–100
- [53] Braak T, Cajo J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167–1179
- [54] Frouz J, Prach K, Pižl V, et al. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(1): 109–121
- [55] Jeloudar Z J, Arzani H, Jafari M, et al. Vegetation community in relation to the soil characteristics of Rineh rangeland, Iran[J]. Caspian Journal of Environmental Sciences, 2010, 8(2): 141–150
- [56] 王洪丹, 王金满, 曹银贵, 等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5098–5108
- [57] 茹淑瑛, 江锋, 叶永安. 中医证素研究中多元统计分析方法的应用解析[J]. 中国中医基础医学杂志, 2012(6): 612–613
- [58] 谭秋锦. 峡谷型喀斯特不同生态系统植被与土壤的耦合关系[D]. 广西: 广西大学, 2014
- [59] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特常绿阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3472–3481

- [60] 韩美荣. 喀斯特峰丛洼地典型生态系统植被与土壤协同演变规律研究[D]. 江西: 江西农业大学, 2012
- [61] 和丽萍. 磷矿矿区废弃地植被恢复土壤质量演变及评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2014
- [62] 董伟华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用[J]. 土壤, 2016, 48(2): 211–218
- [63] 丁青坡, 王秋兵, 魏忠义, 等. 抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特性研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 262–267
- [64] Fernandez C. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE and SEDD[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2003, 58(3): 128–136
- [65] Sainju U M, Good R E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests[J]. Plant and Soil, 1993, 150(1): 87–97
- [66] Pu M, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment[J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(3): 645
- [67] Liu X, Zhou W, Bai Z. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990–2015[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 447–451
- [68] 刘毅维, 韦小丽, 姚华忆, 等. 不同田间持水量对光皮树苗速生期生长及生理生化的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(2): 124–127
- [69] Burd G I, Dixon D G, Glick B R. Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2000, 46(3): 237–245
- [70] Hetrick B A, Wilson G W, Figge D A. The influence of mycorrhizal symbiosis and fertilizer amendments on establishment of vegetation in heavy metal mine spoil[J]. Environmental Pollution, 1994, 86(2): 171
- [71] Huang L, Zhang P, Hu Y, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. Global Ecology & Conservation, 2015, 4: 255–263
- [72] Morennode H M, Merinomartin L, Nicolau J M. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate[J]. Catena, 2009, 77(1): 39–47
- [73] Mariano M D L H, Merinomartin L, Espigares T, et al. Soil erosion-vegetation interactions in Mediterranean-dry reclaimed mining slopes// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts[C]. 2014
- [74] 张圆圆, 徐先英, 刘虎俊, 等. 石羊河流域中下游河岸植被与土壤特征及其相关分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 115–120
- [75] 单长卷, 梁宗锁, 郝文芳. 黄土高原刺槐林生长与土壤水分关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1341–1346
- [76] Min B M, Kim J H. Plant succession and interaction between soil and plants after land reclamation on the west coast of Korea[J]. Journal of Plant Biology, 2000, 43(1): 41–47
- [77] Boldt-Burisch K, Naeth M A, Schneider B U, et al. Linkage between root systems of three pioneer plant species and soil nitrogen during early reclamation of a mine site in Lusatia, Germany[J]. Restoration Ecology, 2015, 23(4): 357–365
- [78] 霍锋. 研石废弃地土壤养分与有毒元素对植被恢复的影响[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2006
- [79] Parrotta J A. The role of plantation forests in rehabilitating degraded tropical ecosystems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1992, 41(2): 115–133
- [80] Ciarkowska K. Organic matter transformation and porosity development in non-reclaimed mining soils of different ages and vegetation covers: A field study of soils of the zinc and lead ore area in SE Poland[J]. Journal of Soils & Sediments, 2017: 1–14
- [81] 田呈明, 刘建军, 梁英梅, 等. 秦岭火地塘林区森林根际微生物及其土壤生化特性研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 19–22
- [82] 吕富成, 王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 225–231
- [83] Li J, Zhou X, Yan J, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 87: 56–62
- [84] 刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 705–713
- [85] 肖礼, 赵俊峰, 黄懿梅, 等. 永利露天煤矿排土场不同植被类型下土壤理化性质和酶活性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 89–93
- [86] 寇建村, 杨文权, 韩明玉, 等. 行间种植豆科牧草对苹果园土壤微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(4): 676–682
- [87] 杨胜香. 广东大宝山多金属矿排土场生态恢复[D]. 广州: 中山大学, 2010

Interaction Between Reclaimed Soil and Vegetation in Mining Area: A Review

ZHANG Zhaotong¹, WANG Jinman^{1,2*}, ZHANG Jiarui¹

(1 College of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: As the two main factors in reclamation, soil and vegetation play important roles in the ecological restoration of mining area. In this paper the interactions are explored between the changes in soil and vegetation succession in coal-mine ecosystems, potential functional relationships, succession rules of reclaimed soil and vegetation, research methods and mechanism of interaction between reclaimed soil and vegetation are also discussed. Since linear analysis was mainly used in previous research, while the continuous and dynamic research and comprehensive analyses were insufficient, so for future study, more attentions should be paid to dynamic and comprehensive analyses on the interactions between soil and vegetation in order to offer new perspectives for the study of land reclamation and ecological restoration.

Key words: Land reclamation; Soil; Vegetation; Interaction mechanism