

黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律

王金满^{1,2}, 郭凌俐¹, 白中科^{1,2*}, 杨睿璇¹, 张萌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: 恢复受损的土壤和植被是矿区生态恢复的关键, 植被恢复过程的实质是植被-土壤复合生态系统相互作用的过程。该文通过典型小区调查的方法, 选择山西平朔州安太堡露天煤矿复垦排土场为研究区, 分析了不同复垦年限(3、5、10、12和17a)土壤环境因子和乔木林地植被生物量的动态演变规律, 建立了黄土区露天煤矿排土场复垦土壤环境因子和乔木林地植被生物量 Logistic 演替模型, 并构建了土壤-植被交互影响的偏微分方程组。相关系数及显著性检验表明所建立的土壤各环境因子演变模型和乔木林复垦地的植被生物量演变模型有效, 能够很好地反映排土场的土壤因子和植被生物量的动态演变过程; 随着复垦年限的增加, 研究区土壤环境因子质量不断提升并逐渐接近原地貌, 土壤因子和植被生物量都呈 S 型变化, 符合 Logistic 生长演替模型; 土壤环境因子与植被生物量二者交互作用明显, 符合 Kolmogorov 捕食模型。该研究可为黄土区露天矿排土场土地复垦与生态恢复提供理论依据。

关键词: 土地复垦, 土壤, 植被, 排土场, 黄土区, 交互影响

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.028

中图分类号: S153.6; F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0223-10

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.

Wang Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 223-232. (in Chinese with English abstract)

0 引言

煤炭开采对土地、生态和人居环境产生了巨大破坏。虽然中国自 20 世纪 80 年代初期就开展矿区土地复垦工作, 但目前中国的土地复垦率仍然比较低, 明显落后于欧美发达国家。目前, 中国露天矿煤炭的产量已经从 4% 增加到了 30%, 露天采煤产生的损毁土地主要为排土场^[1]。山西省平朔露天矿区作为中国露天采煤的典型区域之一, 其地形地貌破碎, 土壤结构松散, 自然植被破坏严重, 生态环境极其脆弱^[2]。本区域露天煤矿开采形成了大量排土场, 不仅对地表景观产生了较大破坏, 压占了大量土地, 而且影响了动植物生境, 对当地的生态环境构成了严重威胁, 从而使水土流失、土地退化等问题日趋严重。因此, 排土场生态系统的恢复和重建已成为

近年来关注的焦点, 其中土壤和植被的恢复是排土场生态系统恢复和重建的基础工作。

研究排土场复垦土壤和植被的演替规律和交互影响作用, 是为了更好地分析排土场重构土壤和重建植被的动态变化过程, 探寻土壤和植被的交互影响机制, 从而挖掘最优的土壤重构和植被重建组合模式。排土场复垦植被与土壤环境因子之间关系复杂, 土壤和植被的复杂交互影响和演替规律目前尚不明确。国外对复垦土壤和植被演替规律研究比较早, Costigan 等^[3]研究表明限制矿区植被生长的因子主要有土壤肥力和 pH 值, Dancer 等^[4]提出植被群落的动态演替受 N, P 和有机质等因素的影响, Alday 等^[5]研究发现采煤损毁土地植物演替受复垦方法的影响, 当覆土厚度增大时植被演替受复垦时间和土壤 pH 值的影响, Frouz 等^[6]分析了矿区复垦土壤与植被的演替规律及其交互影响, 发现土壤和植被在矿区生态系统演替过程中发挥着重要的作用。中国对于矿区复垦土壤和植被演替的研究时间较晚, 王改玲等^[2]发现安太堡露天煤矿区植被恢复受水分、温度、土壤状况等限制性因子的影响, 郭道宇^[7]、张桂莲^[8]等发现有机质是决定植被群落稳定性的重要因子, 郭祥云等^[9]对排土场复垦植被与土壤因子进行二维排序, 发现影响海州露天矿排土场植被生长的主要因素有全氮、有机质、速效磷等,

收稿日期: 2013-04-03 修订日期: 2013-09-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2652012072)

作者简介: 王金满(1979-), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士, 中国农业工程学会会员(E040100098M), 主要从事土地整治与生态恢复研究。北京 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 100083。

Email: wangjinman2002@163.com

*通信作者: 白中科(1963-), 男, 山西运城人, 教授, 博士, 博士生导师, 中国农业工程学会会员(E041200374S), 主要从事土地整治与生态恢复研究。北京 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 100083。

Email: baizk@cugb.edu.cn

许建伟等^[10]分析了黄土区大型露天矿复垦土壤因子对生物多样性的影响,马建军^[11]以地处黄土高原丘陵沟壑区的黑岱沟露天煤矿复垦地为研究对象,揭示了修复地“植物群落—土壤—土壤微生物群落”生态系统的特征,并探讨了复垦区生态环境质量变化和生态修复效应,陈洪祥等^[12]研究了黑岱沟露天煤矿复垦区不同植被恢复模式下的土壤特性,姚敏娟^[13]分析了不同植被配置类型对土壤养分、土壤含水量、土壤水分有效性和土壤贮水量的影响。上述研究大多集中在影响植被群落演替的土壤因素的确定,以及不同复垦模式对土壤性状等的影响,对于复垦排土场的植被生物量与土壤环境因子演变规律和交互影响关系的研究较少,本文通过对黄土区露天煤矿排土场复垦土壤环境因子与植被生物量的演变规律进行分析,探讨露天煤矿排土场复垦土壤与植被相互影响规律和模型,旨在为黄土区露天矿区排土场土地复垦与生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选平朔露天矿区内的安太堡煤矿(图1),该矿位于黄土高原东部、山西省北部的朔州市平鲁区境内,属于山西黄土高原朔平之地低山丘陵,矿区属典型的温带半干旱大陆性季风气候,春冬季风大,风沙严重,夏季凉爽,平均气温为4.8~7.8℃,年降水量为450 mm左右。本区地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带,植被覆盖率低且植被多为耐旱性植物。随着煤炭的大量开采,矿区植被完全被破坏,生态环境不断恶化,矿区正在进行土地复垦与植被重建。具体研究地点选在安太堡煤矿南排土场,南排土场面积180.5 hm²,最终标高1465 m,容量1.16亿 m³,排土高度150 m,1985年开始排弃,1989年排弃结束,1992年开始复垦,是安太堡矿复垦较早的区域之一,该排土场覆土100 cm,目前已经形成榆树、刺槐、油松、沙棘等为主的林、草、灌多层次、多类型的植被结构,其生态环境得到有效的恢复。至2010年底,复垦面积为174.94 hm²,其中林草地面积为140.05 hm²,耕地面积为34.89 hm²。

1.2 土壤样品采集

1.2.1 土壤样品采集方法

样地的复垦时间为1993年,刺槐、油松隔行间种,行距为2 m,刺槐株距为1 m,油松株距为5 m。根据安太堡矿区南排土场油松、刺槐混交林复垦土地土壤长期监测数据,分别选择复垦3、5、10、12和17 a的表层土壤进行研究。并在复垦土

地的附近选择有代表性的原地貌土壤进行对照。各复垦年限表层土壤的采样方案如下:选择1 hm²样地,按照W型样点布设方案在样地布设5个10 m×10 m样地,在这5个样地和原地貌内随机选择3块面积1 m×1 m的小样地,在每块小样地分别用土钻取表层30 cm的土壤,每块样地随机取土样3个,将这9个样点土壤充分混合均匀后装入取土袋中供测试土壤特性参数使用。



图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of geographic location for study region

1.2.2 土壤环境因子测定方法

测定的土壤因子有有机质、全氮、速效磷、速效钾和干容重。土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定,全氮采用FOSS2300全自动凯氏定氮仪测定,速效磷采用碳酸氢钠法,速效钾测定采用乙酸铵提沸火焰光度法,土壤干容重采用环刀法测定。

1.3 林木调查及计算

2010年8月对1 hm²样地内所有3种的林木(刺槐、油松和榆树,榆树为入侵物种)的胸径(diameter at breast height, DBH)、高度进行测量,并统计各树种的株数。用游标卡尺测量DBH<5 cm的树木的胸径,用胸径尺测量DBH≥5 cm的树木的胸径,用米尺测量林木的高度。计算林木的平均高度,由平均胸径与平均高度粗略测算林木的材积,最后计算林木的蓄积量。

由于复垦年限较短,树木的直径与高度都不是

很大，树木的上下直径相差不大，采用式（1）计算各树种材积。

$$V = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 H \quad (1)$$

植被单位面积的蓄积量采取 $M = V \times N$ 计算，其中 V 为材积 N 为单位面积的株数。

由于前期未对不同复垦阶段各树种的存活数、胸径和株高等参数进行测定，采用空间代替时间的方法，即将林木依胸径大小分级，从而把树木径级从小到大的顺序视为时间顺序关系，第 1 径级对应第 1 龄期，第 2 径级对应第 2 龄期，如此一一对应，统计各龄期株数，分析各林木存活的动态变化。鉴于不同树种生长状况不同，其龄期划分也不同：刺槐、榆树每一龄期径级间隔 3 cm，油松每一龄期径级间隔 1 cm。静态生命计算公式如下

$$\begin{aligned} l_n &= (a_n / a_0) \times 1000 \\ d_n &= l_n - l_{n+1} \\ q_n &= (d_n / l_n) \times 100\% \\ L_n &= (l_n - l_{n+1}) / 2 \\ T_n &= \sum_n L_n \\ e_n &= T_n / l_n \\ K_n &= \ln l_n - \ln l_{n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， n 为龄期数，年； a_n 为在 n 龄期内现有个体数，株； a_0 为 a_n 的初始值，株； l_n 为在 n 龄期开始时标准化存活个体数（一般转化值为 1000），株； d_n 为从 n 到 $n+1$ 龄期间隔期内标准化死亡数，株； q_n 为从 n 到 $n+1$ 龄期间隔期间死亡率，%； L_n 为从 n 到 $n+1$ 龄期间隔期间还存活的个体数，株； T_n 为从 n 龄期到超过 n 龄期的个体总数，株； e_n 为进入 n 龄期个体的生命期望寿命，年； K_n 为消失率，%。

同时，在安太堡露天煤矿西排土场选择同复垦模式（覆土 100 cm，刺槐与油松混交）不同复垦阶段的复垦林地（4、6、12 和 17 a）随机各选择 3 个 10 m×10 m 的样方用游标卡尺测量 DBH < 5 cm 的树木的胸径，用胸径尺测量 DBH ≥ 5 cm 的树木的胸径，并用米尺测量林木的高度，统计各树种的株数。

2 土壤与植被动态演替模型

2.1 土壤的 Logistic 生长演化模型

复垦土壤中的有机质对土壤肥力、植被生长发育等方面都起着至关重要的作用。土壤容重是反应复垦土壤熟化程度的重要指标之一。氮、磷、钾是植物生长中的主要营养元素，氮是蛋白质的主要成

分，在多方面影响植物的生长和代谢；磷能以多种形式参与植物体内各种代谢，具有提高植物的抗逆性和适应外界环境的能力；钾不仅可以促进光合作用，还可促进植物对氮的吸收和利用，植物生长所需的、含量最高的金属元素钾也主要来源于土壤。因此，选择有机质、土壤容重、N、P、K 因子进行复垦土壤演变规律分析，并建立各土壤环境因子以时间为自变量的非线性回归方程。模型的建立采用乔木林地区的土壤演化数据，复垦年限分别为 3、5、10、12 和 17 a。本文研究的土壤因子演替采用 Logistic 模型

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{S} \right) \quad (3)$$

式中， x 为土壤环境因子值； t 为复垦年限，a； r 为土壤环境因子增长率； S 为初始土壤环境因子值。

由各土壤环境因子值通过 SPSS13.0 软件拟合土壤各环境因子演化 Logistic 模型。

2.2 植被的 Logistic 生长演化模型

植被很多因素的生长都遵循 Logistic 生长模型^[14]。林木蓄积量反应林木资源总规模和水平的基本指标之一，也是反映林木资源的丰富程度、衡量林木生态环境优劣的重要依据，同时也可反映植被群落在自然环境条件下的生产能力^[15]。因此，林木蓄积量是衡量复垦区植被恢复状况的基本指标。本文主要研究排土场复垦地林木蓄积量随复垦时间变化的生长演化规律。选择与土壤取样相同的样地测算林木蓄积量，通过前期测得的株高、胸径等数据对样地内的主要树种（榆树、刺槐和油松）进行植被总蓄积量计算。同样采用 Logistic 生长模型（式（3））^[14] 通过 SPSS13.0 软件获取林木蓄积量的演变规律。

2.3 土壤与植被的交互影响模型

土壤状况与植物群落的发展存在着密切联系。在植被演替的前期阶段，一般以土壤性质的内因动态演替为主^[16]，土壤影响着植被的变化同时也会因植被群落的变化而发生改变，土壤的性质与植物群落结构和植物多样性有密切的关系^[17-18]。本文在土壤环境因子对植被的蓄积量影响的基础上进行线性回归得出土壤与植被的线性方程，综合植被与土壤演替模型最终得到二者交互模型，交互影响模型采用 Kolmogorov 捕食模型，其形式为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = xf(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = yf(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

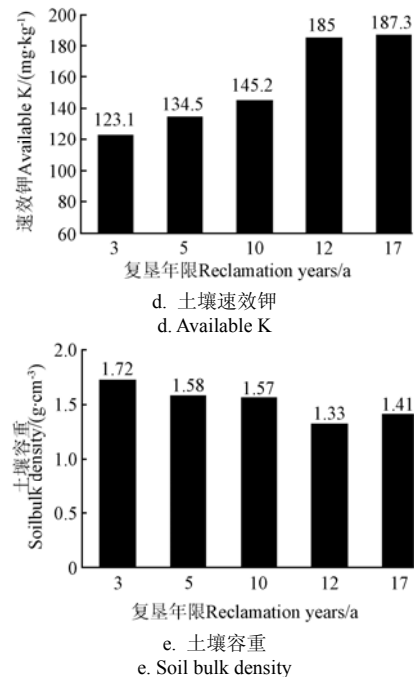
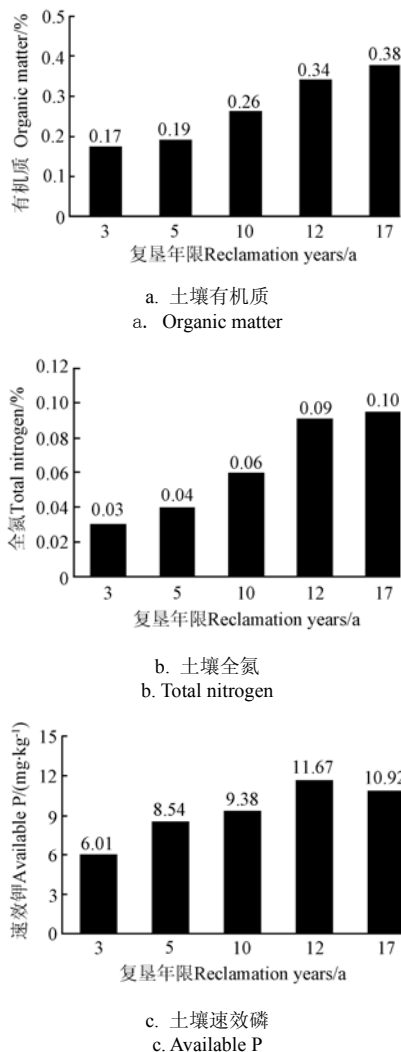
式中， y 为林木蓄积量， m^3 。

3 结果与分析

3.1 土壤环境因子动态演替规律与模型

3.1.1 复垦土壤环境因子动态演替规律

油松和刺槐混交复垦土地表层土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾和土壤容重随复垦年限的变化见图 2。从图 2 可知, 表层土壤环境因子质量不断提升, 并逐渐接近原地貌。土壤环境因子中的土壤有机质的含量初期低于原地貌, 随着时间的增加土壤有机质的含量逐渐增加并接近于原地貌; 土壤全氮标示土壤氮素的总储量, 是衡量土壤氮素供应情况的重要指标, 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; 土壤速效磷常用来衡量土壤磷素的供应状况, 复垦土壤的速效磷呈 S 型增长并逐渐接近原地貌; 土壤速效钾初期低于原地貌, 随着复垦时间的增加成 S 型增长趋势并逐渐接近原地貌; 土壤容重是土壤紧实度的反应, 与土壤孔隙的大小和数量密切相关, 随着复垦时间的增加, 复垦后的土壤容重逐渐减小并接近原地貌。究其原因, 复垦土壤环境因子质量的提升, 与植被对其的影响有很大的关系^[2,19]。



注: 原地貌表层土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾和容重的值为 0.39%、0.10%、15.49 mg·kg⁻¹、179.2 mg·kg⁻¹ 和 1.42 g·cm⁻³。

Note: The soil organic matter, total nitrogen, available P, available K and soil bulk density in original landscape was 0.39%, 0.10%, 15.49 mg·kg⁻¹, 179.2 mg·kg⁻¹ and 1.42 g·cm⁻³, respectively.

图 2 不同复垦年限排土土壤 5 个指标的变化

Fig.2 Changes of five indicators in different reclamation years

3.1.2 复垦土壤环境因子演替模型

本研究采用 Logistic 生长模型来表达各土壤环境因子值的演替, 依据土壤各环境因子值用 SPSS13.0 软件拟合各因素的 Logistic 模型 (表 1)。从表中看出, 各模型的相关系数都比较高, 且显著性检验值都小于 0.05, 说明所建立的模型方程能够较好地反映研究区复垦乔木林地土壤因素的演变规律, 所建立的方程有效, 研究区复垦乔木林地土壤环境因子的动态演替符合 Logistic 模型。土壤各环境因子总体上随着复垦年限的增加成 S 型增长或降低, 在不受外界自然环境条件 (如自然灾害等) 的影响下后期逐渐达到稳定状态。

土壤是植物生长与生存的载体和物质基础, 土壤养分的丧失、结构的破坏势必会导致整个生态系统的崩溃^[20]。白中科等^[21-22]认为黄土区经过采煤扰动后土地极度退化, 无法在自然条件下恢复, 必须借助人工支持和诱导。土壤养分含量多少是生态系统植被恢复的关键, 对于矿区破坏生态系统恢复的主要任务是改善土壤的养分状况, 矿区复垦这种人工恢复的方式能增加土壤养分, 改善土壤状况, 加速植被的恢复进程, 但是人工恢复对土壤的改良作用也是有限的。由图 2 可以看出, 复垦初期土壤中各因子质量都很差, 但是复垦后各因子质量的增长速度较大, 这是由于重建的植被与其相互作用的结果, 相比于土壤的自然恢复速率会大大提高。

表 1 各土壤环境因子演变的 Logistic 模型
Table 1 Logistic model of soil environment factor development

土壤环境因子 Soil environmental factors	Logistic模型 Logistic model	相关系数 r^2 Correlation coefficient r^2	显著性检验 α Significance test α
有机质 Organic matter	$\frac{dx_1}{dt} = 0.137x_1 \left(1 - \frac{x_1}{0.496}\right)$	0.957	0.004
全氮 Total nitrogen	$\frac{dx_2}{dt} = 0.115x_2 \left(1 - \frac{x_2}{0.236}\right)$	0.918	0.010
速效磷 Available P	$\frac{dx_3}{dt} = 0.09x_3 \left(1 - \frac{x_3}{15.973}\right)$	0.741	0.043
速效钾 Available K	$\frac{dx_4}{dt} = 0.046x_4 \left(1 - \frac{x_4}{506.32}\right)$	0.867	0.021
土壤容重 Soil bulk density	$\frac{dx_5}{dt} = (-0.042)x_5 \left(1 - \frac{x_5}{2.230}\right)$	0.851	0.025

注: x_1 为土壤有机质, %; x_2 为土壤全氮含量, %; x_3 为土壤速效磷含量, $mg \cdot kg^{-1}$; x_4 为土壤速效钾含量, $mg \cdot kg^{-1}$; x_5 为土壤干容重, $g \cdot cm^{-3}$ 。
Note: x_1 is soil organic matter, %; x_2 is total nitrogen, %; x_3 is available P, mg/kg ; x_4 is available K, $mg \cdot kg^{-1}$; x_5 is soil bulk density, $g \cdot cm^{-3}$.

3.2 植被生物量动态演替规律与模型

3.2.1 植被生物量演替规律

安太堡露天煤矿西排土场不同复垦阶段各树种的平均高度和平均胸径测量值见表 2。由于植被的生长遵循 Logistic 生长模型^[14], 利用 SPSS13.0 软件对各树种的平均胸径和平均高度进行 Logistic 生长模型的拟合, 结果见表 3。根据拟合的不同树种胸径和株

高 Logistic 生长模型计算研究区不同复垦阶段的胸径和株高(表 4), 并根据式(2)计算不同复垦阶段各树种的存活数(表 5)。根据胸径、株高和各树种的存活数计算研究区不同复垦年限(3、5、10、12 和 17 a)样地植被蓄积量, 计算结果见表 5。从表中可以看出, 随着复垦年限的增加, 各树种植被总蓄积量都呈增加的趋势。

表 2 各树种的平均胸径和平均高度
Table 2 Average breast diameter and average height of each species

复垦年限 Reclamation years/a	刺槐 Locust		榆树 Elm		油松 Chinese pine	
	高度 Height/cm	胸径 DBH/cm	高度 Height/cm	胸径 DBH/cm	高度 Height/cm	胸径 DBH/cm
4	157	-	79	-	213	-
6	325	2.40	165	1.24	245	3.12
12	-	5.70	-	3.07	-	5.20
17	555	7.69	374	4.62	447	7.53

表 3 各树种胸径和株高的 Logistic 模型
Table 3 Logistic model of breast diameter and height of each species

树种 Tree species	胸径 DBH			株高 Height		
	模型 Model	相关系数 r^2 Correlation coefficient r^2	显著性 α Significance α	模型 Model	相关系数 r^2 Correlation coefficient r^2	显著性 α Significance α
刺槐 Locust	$d_1 = \frac{8.804}{1 + e^{2.571 - 0.265t}}$	0.975	0.002	$h_1 = \frac{5.554}{1 + e^{3.482 - 0.638t}}$	0.798	0.044
榆树 Elm	$d_2 = \frac{6.001}{1 + e^{2.738 - 0.232t}}$	0.988	0.001	$h_2 = \frac{3.753}{1 + e^{3.481 - 0.54t}}$	0.817	0.035
油松 Chinese pine	$d_3 = \frac{21.218}{1 + e^{2.391 - 0.106t}}$	0.996	<0.001	$h_3 = \frac{7.567}{1 + e^{1.338 - 0.1t}}$	0.998	<0.001

注: d_1 、 d_2 、 d_3 分别为刺槐、榆树和油松的胸径, cm; h_1 、 h_2 、 h_3 分别为刺槐、榆树和油松的株高, m。

Note: d_1 , d_2 and d_3 is DBH of locust, elm and Chinese pine, respectively, cm; h_1 , h_2 and h_3 is height of locust, elm and Chinese pine, respectively, m.

表 4 不同复垦年限的植被生长参数
Table 4 Vegetation growth parameter in different reclamation years

复垦年限 Reclamation years/a	刺槐 Locust			榆树 Elm			油松 Chinese pine		
	高度 Height/m	胸径 DBH/cm	材积 Volume/ $10^{-3}m^3$	高度 Height/m	胸径 DBH/cm	材积 Volume/ $10^{-3}m^3$	高度 Height/m	胸径 DBH/cm	材积 Volume/ $10^{-3}m^3$
3	0.958	1.274	0.122	0.505	0.689	0.019	1.979	2.371	0.874
5	2.375	1.965	0.720	1.179	1.027	0.098	2.285	2.856	1.464
10	5.264	4.576	8.657	3.272	2.382	1.458	3.150	4.434	4.864
12	5.504	5.706	14.074	3.575	3.069	2.645	3.523	5.224	7.551
17	5.551	7.690	25.781	3.741	4.620	6.271	4.462	7.570	20.082

表 5 不同复垦年限的植被蓄积量
Table 5 Vegetation volume in different reclamation years

复垦年限 Reclamation years/a	刺槐 Locust			榆树 Elm			油松 Chinese pine			总蓄积量 Total volume /m ³
	材积 Volume /10 ⁻³ m ³	株数 Number	蓄积量 Stand volume /m ³	材积 Volume /10 ⁻³ m ³	株数 Number	蓄积量 Stand volume /m ³	材积 Volume /10 ⁻³ m ³	株数 Number	蓄积量 Stand volume/m ³	
3	0.122	60	0.007	0.019	8	<0.001	0.874	72	0.063	0.070
5	0.720	400	0.288	0.098	10	0.001	1.464	130	0.190	0.479
10	8.657	900	7.790	1.458	65	0.095	4.864	306	1.490	9.375
12	14.074	1000	14.074	2.645	92	0.243	7.551	345	2.605	16.920
17	25.781	1100	28.360	6.271	100	0.630	20.082	400	8.030	37.020

3.2.2 乔木林蓄积量动态演替模型

蓄积量随复垦时间变化的 Logistic 模型为

$$\frac{dy}{dt} = 0.468y \left(1 - \frac{y}{42.178} \right) \quad (5)$$

植被蓄积量模型的相关系数 r^2 为 0.983, 显著性检验 $\alpha=0.001 < 0.05$ 。植被蓄积量的 Logistic 模型拟合很好, 方程能够很好地反映出排土场复垦乔木林蓄积量的动态演变过程。

3.3 土壤与植被的交互影响与模型

将土壤各环境因子(有机质、全氮、速效磷、速效钾、土壤容重)与乔木林地蓄积量进行线性回归拟合, 得到有机质、全氮、速效钾与植被的生物量变化的拟合模型, 其相关系数 r^2 分别为 0.877, 0.808, 0.791, 且显著性检验值分别为 0.019, 0.038, 0.044 (均小于 0.05), 说明上述 3 个模型所建立的回归方程有效。其拟合方程为:

有机质与植被生物量回归拟合

$$y = 157.758x_1 - 29.790 \quad r^2 = 0.877 \quad (6)$$

全氮与植被生物量回归拟合

$$y = 466.996x_2 - 16.713 \quad r^2 = 0.808 \quad (7)$$

速效钾与植被生物量回归拟合

$$y = 0.460x_4 - 58.476 \quad r^2 = 0.791 \quad (8)$$

利用 SPSS13.0 软件将有机质、全氮、速效钾与植被生物量进行多元线性回归拟合, 结果显示三者所拟合方程的显著性检验值为 $0.119 > 0.05$, 误差较大。而有机质与全氮两个土壤环境因子与植被生物量多元线性回归拟合的方程满足条件, 其方程的显著性检验值为 $0.026 < 0.05$, 拟合方程为

$$y = 656.776x_1 - 1547.538x_2 - 66.714 \quad r^2 = 0.974 \quad (9)$$

式(9)说明有机质和全氮对植物蓄积量的影响较大。速磷、速钾、容重被剔除, 说明在本研究这些因子对蓄积量的影响相对较小。在研究区复垦乔木林地的土壤环境因子中, 用有机质和全氮来解释土壤因子对蓄积量的影响程度较好。

由植被生物量和土壤环境因子中有机质和全氮

演替模型, 依据 Kolmogorov 捕食模型, 综合得出植被与土壤环境因子的交互影响的偏微分方程组

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = 0.140x_1 \left(1 - \frac{y + 1547.538x_2 + 66.714}{325.761} \right) \\ \frac{dx_2}{dt} = 0.228x_2 \left(1 - \frac{656.776x_1 - 66.714 - y}{170.229} \right) \\ \frac{dy}{dt} = 0.468y \left(1 - \frac{656.776x_1 - 1547.538x_2 - 66.714}{42.178} \right) \end{cases} \quad (10)$$

本研究的复垦地区乔木林植被的生物量与土壤环境因子有关, 其中对其影响最大的是有机质和全氮含量。究其原因, 土壤有机质不但影响土壤潜在肥力, 而且对植被的生长发育影响最大, 氮素也是影响植被发育的关键因子^[23]。随着复垦年限的延长, 土壤环境各因子逐渐改善并趋于稳定, 影响植被群落向丰富、稳定的结构发展, 植被蓄积量逐年增长, 使复垦区生态系统逐渐趋于稳定。

植被生物量的增加也有利于土壤环境因子质量的改善。对于一般退化生态系统来说, 自然恢复虽然可以增加土壤养分以及植被盖度等, 但是要恢复一个完整的生态系统, 则需要通过栽植人工林来加速这一过程。土壤与植被的自然恢复难以在短期内改善生态系统的结构和功能^[24], 尤其对于土壤性质的改善需要一个相当长的恢复过程。所以, 对于矿区排土场这种经过多重破坏后重建的生态系统, 在其自我恢复能力比较弱的情况下, 依赖其自然恢复能力, 是远远不够的^[25]。李裕元等^[26]的研究结果表明, 矿区植被的自然恢复只有在种源或繁殖体充足的条件下才可能实现, 且比人工恢复的时间要长得多。如果只依靠土壤与植被的自然恢复, 植被自然演替到灌草群落一般需要 15~30 a, 而恢复到森林群落则需 100 a 以上或更长的时间^[27]。因此, 对于复垦的排土场人工引入乔灌木种等, 丰富群落层次结构, 优化群落生态功能, 不仅能够促进土壤性质的改善, 还能使复垦的生态系统在更短时间内恢复到顶级状态。

因此, 在矿区复垦生态恢复中, 应该构建一个

有机整体, 使生态系统的土壤和植被相互促进, 只有这样才能恢复和保持生态系统正常的自我调节和自我维持能力。

4 讨论

4.1 复垦土壤与植被交互影响机制

本研究发现黄土矿区复垦土壤环境各因子呈 S 型变化, 由于复垦初期土壤各因子的不稳定, 植被生长也处于适应阶段, 随着复垦时间的增加以及土壤环境因子质量的改善, 其成为植被恢复演替的动力。当这种作用达到一定程度时, 土壤和植物都受气候等因素的限制, 达到顶级群落阶段, 而顶级群落则为生态平衡的标志^[28]。可见, 复垦土地植被恢复的早期阶段, 很大程度上受土壤环境因素的制约, 土壤状况不仅影响着植物群落的发生、发育和演替的速度, 而且决定着植物群落演替的方向^[29], 不同的土壤养分状况影响植物的生物量, 进而影响植物物种的组成和多样性^[30], 土壤中的氮素是决定植被生产量、多样性和其他物种入侵的重要因子^[31-32], 而磷素则决定着植被群落的生物量与物种组成^[33], 钾素也影响着植物的生物产量。土壤环境因子与植被群落相互联系、相互制约的关系, 不但表明了土壤因素在植被群落演替过程中的作用, 也揭示了植被群落对复垦土壤性质的恢复和改造作用。

4.2 土壤植被交互影响模型的适用性

植被演替与土壤环境因子之间的关系已经被广泛研究^[34-35], 许多研究表明土壤化学因子是影响植被分布的主要因素^[35-38]。在土壤-植被体系中, 大多数植物群落的演替要同时受到多种环境因子的综合影响, 而本研究采用的回归分析只选用了有机质、全氮、速效磷、速效钾和土壤容重 5 个土壤环境因子, 且将影响度小的因子(速效磷、速效钾、土壤容重)剔除, 只选择了有机质和全氮 2 个土壤环境因子与乔木林植被的蓄积量构建了土壤与植被交互影响的偏微分方程组, 因此模型还存在一定的局限性。在复垦乔木林地达到稳定状态后对生物量的影响因素可能会发生变化, 还需对后期土壤与植被的交互影响关系进行深入研究, 为复垦地植被的快速恢复提供科学的对策。

5 结论

本文通过对黄土高原生态脆弱矿区排土场复垦土壤环境因子及植被生物量的动态演替规律进行研究, 得出以下结论:

1) 研究区复垦土壤中有有机质、速效钾、速效磷和全氮的含量随着复垦年限的增加成 S 型增长趋势, 符合 Logistic 模型; 而土壤容重逐渐减小。复

垦土壤的各环境因子随着复垦时间的增加都逐渐接近原地貌, 并逐渐趋于稳定状态。

2) 在复垦乔木林区植被的恢复过程中土壤环境因子对其起到关键性作用, 土壤环境因子趋于稳定的过程, 也是植被生长趋于稳定化的过程, 在土壤因素的影响下植被的蓄积量随着复垦年限的增加逐年递增, 也呈现出 Logistic 增长, 其中对植被生物量影响较大的因子是有机质、全氮。

3) 复垦乔木林区的土壤和植被生物量二者演替的交互作用明显, 可通过偏微分方程组模型进行表达。

[参 考 文 献]

- [1] 黄丹勇. 矿区土地复垦与生态环境恢复综述[J]. 湖南有色金属, 2011(6): 45-49.
Huang Danyong. The review of land reclamation and ecological environment restoration[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2011(6): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王改玲, 白中科. 安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 38-40.
Wang Gailing, Bai Zhongke. Main limiting factors for re-vegetation and measures of dumping site in Antaibao opencast mine[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [3] Costigan P A, Bradshaw A D, Gemmill R. The reclamation of acidic colliery spoil waste I: Acid production potential[J]. Journal of Applied Ecology, 1981(8): 685-878.
- [4] 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): 153-167.
- [5] Alday J G, Marrs R H, Martinez-Ruiz C. Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: The influence of soil and environmental factors[J]. Applied Vegetation Science, 2011, 14(1): 84-94.
- [6] Frouz J, Prach K, Pizl 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.
- [7] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析[J]. 生物多样性, 2007, 15(1): 46-52.
Guo Xiaoyu, Zhang Jintun, Gong Huili, et al. Interspecific association of restored vegetation and related soil factors in Antaibao Mine[J]. Biodiversity

- Science, 2007, 15(1): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张桂莲, 张金屯, 郭道宇. 安太堡矿区人工植被在恢复过程中的生态关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 151—155.
Zhang Guilian, Zhang Jintun, Guo Xiaoyu. Ecological relationships among artificial vegetations during their restoration in Antaibao mining area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1): 151—155. (in Chinese with English abstract)
- [9] 郭祥云, 李道亮. 阜新海州露天煤矿排土场植被与土壤环境关系[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(5): 823—826.
Guo Xiangyun, Li Daoliang. Relationships between plant and soil at Haizhou mine sump in Fuxin[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(5): 823—826. (in Chinese with English abstract)
- [10] 许建伟, 李晋川, 白中科, 等. 黄土区大型露天矿复垦地土壤对植物多样性的影响研究: 以平朔安太堡露天矿排土场为例[J]. 山西农业科学, 2010, 38(4): 48—51.
Xu Jianwei, Li Jinchuan, Bai Zhongke, et al. Effect of reclamation land soil to plant diversity in antaibao opencast coal mine loess zone: A case of discharged soil field in Antaibao opencast coal mine[J]. Journal of Shangxi Agricultural Sciences, 2010, 38(4): 48—51. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马建军. 黄土高原丘陵沟壑区露天煤矿生态修复及其生态效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
Ma Jianjun. Study on Ecological Rehabilitation of Opencast Coal Mine and its Ecological Effects in the Hilly and Gully Area of the Loess Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈洪祥, 张树礼, 马建军. 煤矿复垦地不同恢复模式下土壤特性研究: 以黑岱沟露天煤矿为例[J]. 内蒙古环境科学, 2007, 19(4): 63—67.
Chen Hongxiang, Zhang Shuli, Ma Jianjun. Study on soil attributes of different restoration models of coal mine recovered fields: A case of Heidaigou opencast coal mine[J]. Inner Mongolia Environmental Science, 2007, 19(4): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姚敏娟. 黑岱沟露天矿排土场不同植被配置对土壤养分和土壤水分影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
Yao Minjuan. Effects of Different Vegetation Types on Soil Nutrients and Soil Moisture of Dumping Site in Heidaigou Opencast Mine[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张连翔, 黄丽华, 李杰. 林木胸径与材积的关系: Logistic 衍生模型[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(2): 99—101.
Zhang Lianxiang, Huang Lihua, Li Jie. Relationship between diameter at breast height and volume of forest-tree: Logistic derivation model[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(2): 99—101. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐占军, 侯湖平, 张绍良, 等. 采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 232—240.
Xu Zhanjun, Hou Huping, Zhang Shaoliang, et al. Effects of mining activity and climatic change on ecological losses in coal mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 232—240. (in Chinese with English abstract)
- [16] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析[J]. 土壤学报, 2005, 42(5): 744—752.
Jiao Juying, Ma Xianghua, Bai Wenjuan, et al. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on Antaibao cropland on Hilly-Gullied Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 744—752. (in Chinese with English abstract)
- [17] Morrison I K, Foster N W. Fifteen-year change in forest floor organic and element content and cycling at the Turkey Lakes water-shed[J]. Ecosystems, 2001, 4(6): 545—554.
- [18] Zhu Hanhua, He Xunyang, Wang Kelin, et al. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 51: 1—7.
- [19] 朱志诚. 陕北黄土高原植被基本特征及其对土壤性质的影响[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(3): 280—286.
Zhu Zhicheng. The basic characteristics of vegetation and its effect on soil properties on the Loess Plateau of north Shangxi[J]. Acta Phytocologica & Geobotany Sinica, 1993, 17(3): 280—286. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
Wang Jinman, Yang Ruixuan, Bai Zhongke. Succession law and model of reclaimed soil quality of opencast coal mine dump in grassland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the

- CSAE), 2012, 28(14): 229—235. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郝蓉, 陕永杰, 白中科, 等. 露天煤矿复垦土地的植物群落多样性和稳定性[J]. 煤矿环境保护, 2001, 16(6): 14—16.
Hao Rong, Shan Yongjie, Bai Zhongke, et al. Diversity and stability of plant communities of reclaimed land in open case coal mine[J]. Coal Mine Environmental Protection, 2001, 16(6): 14—16. (in Chinese with English abstract)
- [22] 胡振琪, 张光灿, 魏忠义, 等. 煤矸石山的植物种群生长及其对土壤理化性质的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 491—499.
Hu Zhenqi, Zhang Guangcan, Wei Zhongyi, et al. Plant population growth of coal gangue mountain and its effects on soil physical and chemical properties[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(5): 491—499. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张建彪. 煤矸石山生态重建中的植被演替及其与土壤因子的相互作用[D]. 太原: 山西大学, 2011.
Zhang Jianbiao. Vegetation Sucecession and its Interactions with Soil Properties in Ecological Reconstruction of Coal-gangue Area in Gujiao, China[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] 任海, 杜卫兵, 王俊, 等. 鹤山退化草坡生态系统的自然恢复[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3593—3600.
Ren Hai, Du Weibing, Wang Jun, et al. The natural restoration of degraded rangeland ecosystem in Heshan hillland[J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(9): 3593—3600. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张新时. 关于生态重建和生态恢复的思辨及其科学涵义与发展途径[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 112—118.
Zhang Xinshi. An intellectual enquiring about ecological restoration and recovery, their scientific implication and approach[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 112—118. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李裕元, 邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 252—260.
Li Yuyuan, Shao Ming'an. The change of plant diversity during natural recovery process of vegetation in Ziwuling area[J]. Acta Ecological Sinica, 2004, 24(2): 252—260. (in Chinese with English abstract)
- [27] Lovich J E, Bainbridge D. Anthropogenic degradation of the southern California desert ecosystem and prospect for natural recovery and restoration[J]. Environmental Management, 1999, 24(3): 309—326.
- [28] 杨小波, 吴庆书. 海南岛热带地区弃荒农田次生植被恢复特点[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 477—482.
Yang Xiaobo, Wu Qingshu. The characteristics of secondary vegetation restoration on abandoned cropland in Hainan island tropical region[J]. Acta Phytoecological Sinica, 2000, 24(4): 477—482. (in Chinese with English abstract)
- [29] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, et al. Association between lowland grassland plant communities and properties[J]. Biological Conservation, 2002, 105(2): 199—215.
- [30] Post W M, Pastor J, King A W, et al. Aspects of the interaction between vegetation and soil under global change[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1992, 64(1/2): 345—363.
- [31] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands[J]. Science, 1996, 274(5293): 1720—1723.
- [32] Matthew L B. Effects of increased soil nitrogen on the dominance of alien annual plants in the Mojave Desert[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(2): 344—353.
- [33] Kirkham F W, Mountford J O, Wilkins R J. The effects of nitrogen, potassum and phosphorus addition on the vegetation of a somerset peat moor under cutting management[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(5): 1013—1029.
- [34] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 40—49.
Song Chuangye, Guo Ke. Relationships between plant community and soil on the inter-dune lowland in the middle of Otingdag sandy land[J]. Acta Phytoecological Sinica, 2007, 31(1): 40—49. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张文辉, 卢涛, 马克明, 等. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 552—559.
Zhang Wenhui, Lu Tao, Ma Keming, et al. Plant community distribution environment and space factor analysis in the arid valley of Mingjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(3): 552—559. (in Chinese with English abstract)
- [36] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 等. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 205—209.
Sun Haiyun, Li Xinju, Hu Zhenqi, et al. Variance of reclamation soil quality in Majiata opencast mine region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),

- 2008, 24(12): 205 – 209. (in Chinese with English abstract)
- [37] 陶冶, 刘彤. 天山-阿尔泰山拟南芥种群分布与环境的关系[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 449–459.
Tao Ye, Liu Tong. Relationships between arabis thaliana populations distribution and environmental factors in the Tianshan-Altay mountain region, China[J]. Progress in Geography, 2009, 28(3): 449 – 459. (in Chinese with English abstract)
- [38] Naeth M A, Chanasyk D S, Burgers T D. Vegetation and soil water interactions on a tailings sand storage facility in the athabasca oil sands region of Alberta Canada[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 36(1/4): 19–30.

Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area

Wang Jinman^{1,2}, Guo Lingli¹, Bai Zhongke^{1,2*}, Yang Ruixuan¹, Zhang Meng¹

(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: Loess Plateau is one of the typical opencast coal mining areas in China with its broken topography, loose soil structure, and destroyed natural vegetation, and the ecological environment is fragile in this area. Coal mining has formed a large waste dump, which had imposed great damage on the surface of the landscape. It not only occupied a large amount of land, but also influenced the animal and plant development; it is a serious threat to the ecological environment. Reconstruction of the damaged soil and vegetation is the key to ecological restoration in the mining area, and the process of vegetation restoration actually is an interaction process of a complex ecosystem between vegetation and soil. The typical plot survey method was used to analyze the dynamic succession law of soil environmental factors and vegetation biomass with reclamation years (3, 5, 10, 12 and 17a) in the Shanxi Antaibao opencast coal mine dump. A logistic succession model of reclaimed soil environmental factors and vegetation biomass land arbor forest in the Loess area opencast mine dump were constructed in this study, and the interactions of partial differential equations between soil and vegetation were built. The results indicated as follows: (1) soil organic matter, total nitrogen, available P, and available K had an S-shaped (logistic curve) increasing with reclamation years and soil bulk density gradually decreased. (2) Using SPSS software to fit the equation model, the correlation coefficients of the models were high and the significance tests were less than 0.05, the soil environment factor models and the arbor vegetation biomass model in the reclaimed land was effective, and the dynamic character of the soil factor and vegetation biomass could be well reflected. (3) All reclaimed soil environmental factors (organic matter, total nitrogen, available P, available K, and soil bulk density) gradually closed to those of the original landscape and gradually become stable with reclamation years. Soil environmental factors play a key role in the restoration process of vegetation, and the stabilizing process of soil environmental factors also was the process of vegetation growth which tended to stabilize. The vegetation volume gradually increased with reclamation years under the influence of the soil environmental factors, and which also had a logistic growth trend. The logistic model of arbor vegetation biomass fit well and can reflect the dynamic succession law of arbor vegetation biomass. The organic matter and total nitrogen are the main factors to influence the biomass of vegetation. (4) Interaction between soil and vegetation was significant, and it fitted the Kolmogorov predator-prey model. The relationship between them can be expressed by a partial differential equations model. This research can provide theoretical basis for land reclamation and ecological restoration in the loess area of an opencast coal mine.

Key words: land reclamation, soils, vegetation, dump, loess area, interaction

(责任编辑: 张俊芳)