

黄土高原子午岭不同林龄天然油松林土壤微生物组成研究

王金成, 李海燕, 梁健

(陕西师范大学 生命科学学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 为了认识土壤微生物在天然油松林发展过程中的地位和作用, 利用/ 平板培养法⁰和/ MPN 法⁰测定了不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群和主要功能群组成; 用/ 氯仿熏蒸法⁰测定了土壤微生物生物量碳(MBC)。结果显示, 由 10 a 林发展到 25 a 林, 土壤微生物总数量和细菌数量呈上升趋势, 25 a 之后逐渐下降; 细菌数量在土壤微生物中占绝对优势, 真菌及放线菌数量较少; 10 a 林氨化细菌及纤维素分解菌数量最高, 之后整体呈下降趋势; 由 10 a 林发展到 25 a 林, 固氮菌数量上升, 25 a 后呈下降趋势, 到 40 a 后趋于稳定; 由 10 a 至 40 a 林, 硝化细菌数量无显著变化, 但由 40 a 至 70 a 林, 其数量显著增加; 土壤微生物综合性指标(Shannon) Wiener 指数, 由 10 a 林发展到 70 a 林, 呈增加趋势; 土壤 MBC 以 10 a 林最低, 之后呈增加趋势。研究结果表明, 天然油松林土壤微生物组成有其独特的规律及变化原因。本研究从土壤微生物学角度为黄土高原油松林的保护和管理提供了借鉴。

关键词: 黄土高原; 林龄; 天然油松林; 土壤微生物

文献标识码: A

文章编号: 1002-288X(2010)01-0043-06

中图分类号: Q938.1⁺3

Composition Study of Soil Microorganism in Natural Chinese Pine Forest with Different Growth Years in Ziwuling Forest Region of the Loess Plateau

WANG Jincheng, LI Haiyan, LIANG Jian

(College of Life Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: The natural Chinese pine forest is an important vegetation type in vegetation protection and restoration of the Loess Plateau. To further understand its status and functions during its development process, the three main microgroups and the main functional groups of soils were investigated using the method of plate cultivation and MPN method. Besides, the soil microbial biomass carbon(MBC) was determined by the method of chloroform fumigation. Results showed that there was an increasing trend for the amounts of microorganisms and bacteria in the forest with the growth years from 10 to 25 and after that, they began to reduce. Meanwhile, the amount of bacteria hold an absolute predominance over the total microorganism amount and the rest two types of microorganisms, fungi and actinomycetes, were fewer. The amounts of ammonifying bacteria and cellulose-decomposing microorganisms appeared in the forest with the growth years of 10 and after that they showed a decreased trend. The azotobacter amount showed an increasing trend in the forest with the growth years from 10 to 25, then decreased until 40 years forest, and after that showed a stable trend. There was no significant variation in nitrifying bacteria for the forest with the growth years from 10 to 40, but its amount significantly increased after that. Meanwhile, the comprehensive indexes of soil microorganism (Shannon) Wiener) and the MBC showed an increasing trend from 10 to 70 years. All above results demonstrate that there are a unique principle and the reasons of variation in soil microorganism composition in the natural Chinese pine forest. This study may offer a guidance and reference significance to the protection and management of the natural Chinese pine forest on the loess plateau based on soil microbiology.

Keywords: Loess Plateau; growth year; natural Chinese pine forest; soil microorganism

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在有机质分解、养分循环和植物营养等过程中发挥着关键作用^[1]。作为土壤中物质转化和养分循环的/驱动力,土壤微生物是衡量土壤质量的重要指标之一,直接参与诸多生态过程,常被用来评价退化生态系统中生物群系与功能恢复之间的关系^[2]。土壤微生物群落调控营养物质循环,促进营养元素固定,加速营养物质的循环和产生植物激素^[3],为植物提供可利用的矿物质库^[4]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是干旱半干旱地区有着重要生态与经济价值的造林树种^[5]。油松林是黄土高原森林群落自然演替过程中的重要环节,处于该区森林植被演替的亚顶极位置^[6],是该区生态保护和恢复的重要植被类型之一。近年来对于油松林的研究大多针对的是人工油松林,研究内容主要集中在水分平衡和养分循环等方面^[7,8],但有关天然油松林,尤其是其土壤微生物组成及其变化规律的研究鲜有报道。

本研究以黄土高原中部子午岭林区不同林龄天然油松林为研究对象,利用/平板培养法和 MPN 法 0 研究了土壤微生物 3 大类群和主要功能群组成,用/熏蒸提取)容量分析法 0 测定了土壤微生物生物量碳(MBC)含量随天然油松林发展的变化,研究结果将有助于对土壤微生物在天然油松林生长和发展过程中的地位和作用的认识,为黄土高原天然油松林的保护和恢复提供借鉴,并为黄土高原油松林的土壤肥力变化提供依据。

1 实验材料与研究方法

1.1 研究区自然状况

研究选择在黄土高原中部子午岭林区南端的正宁县中湾林场进行。地理坐标为 108°27'E, 35°17'N, 年平均气温 8.3 °C, 极端最高所温 33.6 °C, 最低所温 -15.7 °C。年均降水量 623.5 mm, 其中 7) 9 月份降水占到 63%。年蒸发量 1 500.8 mm, 干燥度 0.72, 空气相对湿度 60%~70%, 年日照时数 2 200~2 400 h, 无霜期 163 d。属黄土堆积和河流侵蚀不断交替形成的黄土丘陵沟壑地貌, 海拔在 1 450~1 756 m 之间, 具有明显的大陆性气候特征, 属暖温带冷凉半湿润气候区。土壤以森林灰褐土为主, pH 值 7.5~8, 有机质含量约 18 g/kg 左右^[9]。辽东栎林与油松林是该区最为常见且具有重要生态及经济价值的森林植被类型。黄土高原子午岭林区虽为油松

自然分布地带,但因长期人为干扰,油松呈天然群落者主要见于正宁县中湾林区,该区海拔 1 470~1 750 m 的八只窑 300 hm² 的天然油松林,西坡林区岳王山也有小片的天然油松林^[10]。在中国植物区系上隶属于泛北极植物区,中国)日本森林植物亚区的华北地区黄土高原植物亚地区^[6]。

1.2 土壤样品采集

于 2008 年 8 月中旬在天然油松林分布区选择不同林龄的天然油松林(10, 25, 40, 70 a)样地。利用取土钻,按对角线五点取样法^[11],在每一样地中采集 0) 10 cm 深度的土壤,将 5 个点采集的土壤混匀成 1 个土样,每个样地取 3 个重复。所采土样放在冷藏箱中,及时带回实验室,挑除草根,过 2 mm 土壤筛后进行分析处理。

1.3 土壤微生物类群测定

微生物数量测定除硝化细菌采用 MPN 法外,其余均采用稀释平板法。细菌用牛肉膏蛋白胨培养基;放线菌用高氏 1 号培养基;真菌用马丁氏培养基;氨化细菌用蛋白胨琼脂培养基;固氮菌用改良阿须贝无氮琼脂培养基;纤维素分解菌用赫奇逊氏培养基;硝化细菌用改良的斯蒂芬逊培养基^[12,12]。

1.4 土壤微生物生物量碳测定

采用/熏蒸提取)容量分析法 0 测定土壤微生物生物量碳^[13],取相当于 10 g 烘干土重的新鲜土壤 3 份,置于干燥器中,同时放置 1 小杯去乙醇氯仿(含玻璃珠,防暴沸)和 1 小杯 1 mol/L NaOH 溶液,抽真空后 25 °C 培养 24 h,取出去乙醇氯仿和 NaOH 溶液小瓶,抽尽土壤中残留氯仿,用 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液浸提,振荡 30 min(300 r/min),用中速定量滤纸过滤。熏蒸开始的同时,称取同样的土壤 3 份,按照上述方法振荡浸提,得到未熏蒸土样的滤液。另外作 3 个无土壤空白对照。

吸取 10 ml 上述土壤提取液于 100 ml 三角瓶中,准确加入 10 ml 0.018 mol/L K₂Cr₂O₇) 12 mol/L H₂SO₄ 溶液,再加入少许玻璃珠,混匀后置于 175 °C ± 1 °C 石蜡浴中煮沸 10 min。冷却后无损地转移到 100 ml 三角瓶中,用去离子水洗涤消化管 3~5 次,使溶液体积约为 80 ml,加入一滴邻啡罗啉指示剂,用 0.05 mol/L FeSO₄ 标准溶液滴定,溶液颜色由橙黄色变为蓝绿色,再变为棕红色即为滴定终点。

有机碳量(mg/kg) = $0.012/4 \times 10^6 \times \frac{(V_0 - V) \times M}{(V_0 - V) \times f / W}$
式中: M)) FeSO₄ 溶液浓度(mol/L); V₀, V))) 空

白和样品消耗的 FeSO_4 溶液体积 (ml); f))) 稀释倍数; W))) 烘干土重 (g); 0.012 为碳的毫摩尔质量 (g); 10^6 为换算系数。

土壤微生物生物量碳: $B_c = E_c / k_{EC}$

式中: E_c))) 熏蒸与未熏蒸土壤的差值; k_{EC}))) 转换系数, 取值 0.38。

1.5 数据处理

利用 SPSS 16.0 统计分析软件, 对数据进行处理分析。以 Shannon) Wiener 指数^[14]作为土壤可培养微生物的综合性指标, 公式为:

$$H_c = - \sum P_i \ln P_i$$

式中: H_c))) Shannon) Wiener 指数; P_i))) 样品中第 i 种类群个体所占比例。

2 结果与分析

2.1 不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群组成的变化

表 1 为不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群组成。

F 检验结果显示, 不同林龄间土壤微生物总数量差异极显著 ($F_{总} = 86.822 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 多重比较 ($A = 0.05$) 结果表明不同林龄间土壤微生物总数量相互之间皆差异显著 ($P < 0.05$), 由 10 a 林发展到 25 a 林, 土壤微生物总数量呈上升趋势, 25 a 林数量最高, 之后逐渐下降, 70 a 林数量最低。不同林龄天然油松林间土壤细菌与放线菌数量差异极显著 ($F_{细} = 91.242 > F_{0.01}$, $F_{放} = 111.282 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 多重比较 (Duncan, $A = 0.05$) 结果表明, 不同林龄相互之间细菌与放线菌数量差异皆显著 ($P < 0.05$), 由 10 a 林发展到 70 a 林, 细菌数量表现出与微生物总数量相似的变化规律, 放线菌数量表现出逐年下降的趋势。土壤真菌在不同林龄天然油松林间数量差异也极为显著 ($F_{真} = 171.282 > F_{0.01}$, $P < 0.01$); 由 10 a 林发展到 70 a 林, 表现出不同于细菌的变化规律, 真菌数量由 10 a 林发展到 25 a 林数量陡增, 25 a 林发展到 40 a 林数量稍有下降, 至 70 a 林数量达到最高; 多重比较 (Duncan, $A = 0.05$) 结果表明, 不同林龄间真菌数量也表现出显著差异 ($P < 0.05$)。图 1 为不同林龄土壤可培养微生物 Shannon) Wiener 指数。F 检验结果显示, 不同林龄土壤微生物 Shannon) Wiener 指数差异极为显著 ($F = 50.23 > F_{0.01}$, $P < 0.01$)。多重比较 (Duncan, $A = 0.05$) 结果显示, 不同林龄间 Shannon) Wiener 指数总体上呈增加趋势, 由 10 a 林 (0.185 0) 发展到 25 a 林 (0.230 3) 和 40 a 林 (0.251 2) Shannon) Wiener 指数呈平缓增加

趋势, 10 a 林与 25 a 林间, 25 a 林与 40 a 林间均无显著差异 ($P > 0.05$), 70 a 林 Shannon) Wiener 指数数值最高 (0.4823), 且与其它 3 种林龄油松林差异显著 ($P < 0.05$)。土壤微生物数量组成是土壤、植被、气候及人为干扰等多方面因素对微生物综合作用的结果^[15]。刘福德等^[16]研究了连作杨树人工林不同生长阶段林地内土壤微生态环境特征, 结果表明, 随着林龄增加, 人工杨树林土壤细菌和放线菌数量呈下降趋势, 而真菌数量无显著性变化, 此结论与本研究结果不尽相同。引起这种不一致性的原因是多方面的, 其中土地利用方式不同可能是天然油松林土壤微生物组成不同于人工林, 而有其独特变化规律的原因之一。

研究表明, 植被演替过程中土壤微生物组成也在发生变化^[17,18]。Menyailo^[19]的研究表明, 森林植被生长年限超过 27a, 其土壤细菌数量显著减少。本研究中天然油松林演替过程中, 土壤细菌数量的变化也表现出类似的规律, 即由 10 a 林发展到 25 a 林, 土壤细菌数量上升到最高, 之后逐渐下降。杜国坚等^[20]研究显示, 随着林龄的增加, 杉木林地中土壤细菌、放线菌数量呈下降趋势, 而真菌数量出现增加趋势, 本研究结果与此一致。土壤微生物之所以表现出这样的变化规律, 可能的原因是, 随着植被林龄的逐渐增加, 土壤的理化组成也在不断发生变化, 尤其是地面凋落物组成发生了较大的变化, 造成土壤微生物生活环境的改变, 细菌、放线菌及真菌有着不同的生长环境条件要求, 细菌和放线菌通常比较适合在中性至偏碱性的土壤环境生长, 而真菌生长更适合偏酸性的土壤环境; 除此之外, 真菌对于纤维素类物质有着较强的分解利用能力^[17], 这些可能是不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群表现出不同变化规律的原因之一。

本研究中, 依 3 大类群微生物数量对 Shannon) Wiener 指数建立的最优回归方程中, 只有细菌和放线菌参与到该方程的构建中, 表明真菌对 Shannon) Wiener 指数的变化影响不大。细菌和放线菌的偏回归系数均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 放线菌数量的偏回归系数为 -1.103, 细菌数量的偏回归系数为 -0.026。细菌与放线菌数量的偏回归系数皆为负值, 说明伴随着林龄的增加, 细菌与放线菌数量总体上的减少导致天然油松林土壤可培养微生物 Shannon) Wiener 指数增高。随着天然油松林演替的发展, 细菌、放线菌与真菌在土壤中的数量分布愈加均匀。从偏回归系数绝对值大小来看, 前者是后者的 42.42 倍, 说明放线菌数量的变化要比细菌数量的变化对多样性变化的影响大。

表 1 不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群组成

编号	土样	细菌	真菌	放线菌	总计
1	10 a	1 270.00? 33.82 ¹	7.44? 0.87	45.00? 0.67	1 322.44? 34.05
2	25 a	1 492.22? 20.40	51.55? 3.21	27.00? 2.31	1 570.77? 24.75
3	40 a	1 080.00? 29.87	42.50? 2.02	21.45? 0.78	1 143.95? 30.56
4	70 a	486.78? 75.50	73.83? 1.64	10.78? 0.99	571.39? 74.91

注: ¹ 平均值? 标准误。

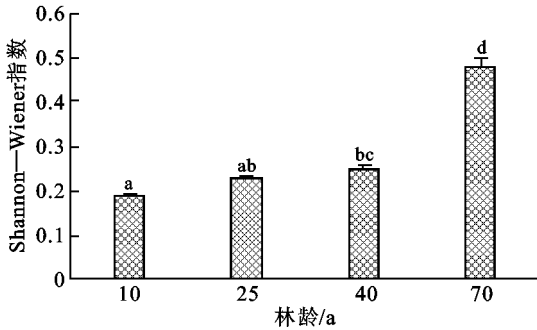


图 1 不同林龄天然油松林土壤可培养微生物 Shannon) Wiener 指数

2.2 不同林龄天然油松林土壤微生物主要功能群组成的变化

图 2 为不同林龄天然油松林土壤微生物功能群的组成。F 检验结果显示, 土壤微生物各功能群在不同林龄间均具有极显著差异 ($F_{固} = 142.433 > F_{0.01}$; $F_{硝} = 23.737 > F_{0.01}$; $F_{氨} = 27.206 > F_{0.01}$; $F_{纤} = 51.482 > F_{0.01}$, $P < 0.01$)。对不同林龄间各类群分别进行多重比较 (Duncan, $A = 0.05$), 就土壤固氮

菌来看, 由 10 a 林 ($1.863 @ 10^7$ cfu/g) 至 25 a 林 ($3.487 @ 10^7$ cfu/g) 数量陡增, 并达到最大, 之后经 40 a 林 ($1.317 @ 10^7$ cfu/g) 发展至 70 a 林 ($1.020 @ 10^7$ cfu/g) 数量骤减, 且 40 a 林与 70 a 林之间差异不显著 ($P > 0.05$)。由 10 a 林发展至 70 a 林, 土壤硝化细菌数量呈上升趋势, 其中 10 a 林 (15.00 cfu/g), 25a 林 (4.40 cfu/g) 和 40 a 林 (33.00 cfu/g) 之间无显著性差异 ($P > 0.05$), 而 70 a 林 (119.00 cfu/g) 与其它林龄差异显著 ($P < 0.05$)。由 10 a 林 y 25 a 林 y 40 a 林 y 70 a 林, 土壤氨化细菌数量呈下降趋势, 分别为 $3.073 @ 10^7$, $2.377 @ 10^7$, $2.267 @ 10^7$ 和 $1.920 @ 10^7$ cfu/g, 其中 25 a 和 40 a 林之间差异不显著 ($P > 0.05$), 70 a 林数量最低, 且与其它 3 种林龄之间差异显著 ($P < 0.05$)。土壤纤维素分解菌数量由 10 a 林 ($7.43 @ 10^6$ cfu/g), 25 a 林 ($4.00 @ 10^6$ cfu/g) 经 40 a 林 ($2.67 @ 10^6$ cfu/g) 发展至 70 a 林 ($2.01 @ 10^6$ cfu/g) 呈下降趋势, 其中 40 a 林与 70 a 林间无显著差异 ($P > 0.05$)。

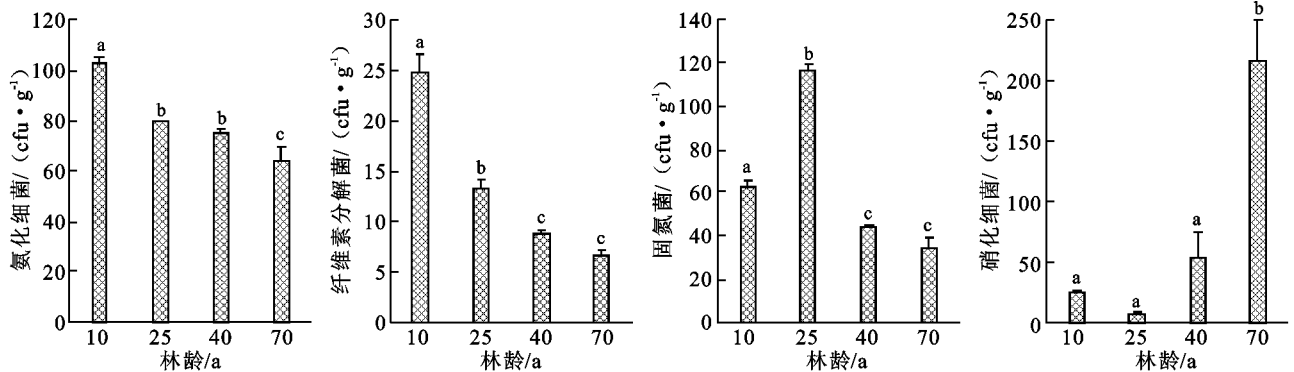


图 2 不同林龄天然油松林土壤微生物功能群的组成 (10^6 cfu/g)

本研究所涉及的土壤微生物主要功能群可分为两大类: 一类与氮素转化有关, 包括固氮菌、硝化细菌和氨化细菌; 另一类是与纤维素的分解有关的纤维素分解菌。氮是森林植被营养中最重要的元素之一^[11]。氮素在森林土壤中的转化包括固氮作用、硝化作用和氨化作用等过程, 土壤微生物氮素生理群数量的变化一定程度上反映了土壤氮素营养的水平 and

转化效率; 土壤纤维素分解菌在森林, 尤其是针叶林土壤纤维素的转化中起着极为重要的作用, 与土壤氮素供给水平密切相关。土壤中氮素生理群及纤维素分解菌的数量组成与植被类型和植被的演替阶段密切相关: 于学珍等^[21]对天童山常绿阔叶林退化演替中土壤微生物的变化研究表明, 随着植被的退化演替, 氨化细菌及多种土壤微生物功能群数量呈明显的

下降趋势;杨承栋等^[22]的研究显示,二代马尾松林中土壤固氮菌数量明显低于一代林;杜国坚等^[20]对杉木连栽林地中纤维素分解菌的变化情况研究表明,土壤中纤维素分解菌含量随连栽年限的增加呈下降趋势。本研究结果与上述研究结果不尽相同,究其原因,除植被类型不同外,天然油松林发展过程中土壤环境的不同变化是造成这种差异的主要原因。在天然油松林由10 a林发展至70 a林,其土壤环境受多种因素影响而变化,其中油松凋落物对土壤环境变化起着极为重要的作用。低龄天然油松林其凋落物数量少,厚度小,凋落物下的表层土壤透气性好。由于油松凋落物分解速度较慢,随着林龄的增加,凋落物数量和厚度也在逐渐增加,凋落物下的表层土壤透气性逐渐变差^[8],且针叶林凋落物可使土壤pH值逐年下降^[23],而生物固氮过程中起着主导作用的固氮梭菌通常适宜于中性或偏碱性的土壤环境,因此,好气性的固氮菌和氨化细菌的数量在逐年降低。25 a林固氮菌数量的陡增,说明天然油松林生长至25 a时,其土壤固氮水平最高。pH值的降低和透气性的下降会使氨化细菌数量逐年下降^[17],故随着天然油松林的演替,能够产生铵离子的两大微生物数量均呈下降趋势。硝化细菌可将氨态氮转变为硝酸态氮^[11]。本研究中,土壤硝化细菌数量在演替过程中逐渐上升,尤其从40 a林至70 a林,因此,土壤铵离子数量在天然油松林自然演替中逐年下降。而铵离子是植物生长所能利用的最为/经济有效0的氮素形式之一^[24]。当土壤中固氮菌和氨化细菌数量降低,硝化细菌数量增高时,会影响到油松根系的氮素营养及依赖于氮素生理群的纤维素分解菌数量。综上所述,固氮菌、硝化细菌、氨化细菌和纤维素分解菌数量随天然油松林演替表现出了独特的变化规律,并且这种数量的变化影响到了土壤C、N转化及油松的生长和油松林的演替。

2.3 不同林龄天然油松林土壤微生物生物量碳(MBC)特征

图3为不同林龄天然油松林土壤MBC变化特征。F检验结果显示,不同林龄土壤MBC差异极为显著($F_{MBC} = 9.12 > F_{0.01}$, $P < 0.01$)。由10 a林发展到70 a林,土壤MBC呈增长趋势。多重比较(Duncan, $A = 0.05$)结果显示,10 a林土壤MBC以最低(157.45 mg/kg),25 a林(365.25 mg/kg)和40 a林(424.53 mg/kg)较10 a林有所上升,25 a林与40 a林之间无显著差异($P > 0.05$),至70 a林达到最高(596.77 mg/kg),70 a林与40 a林之间无显著性差异($P > 0.05$)。

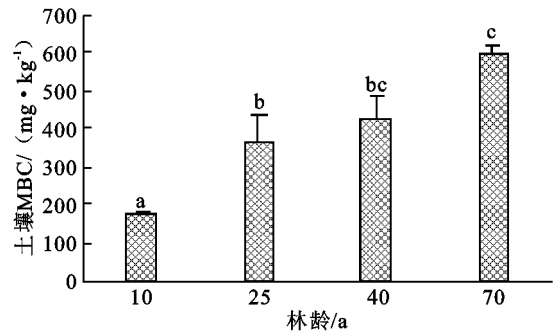


图3 不同林龄天然油松林土壤MBC特征

土壤微生物生物量碳(MBC)是土壤中所有活微生物体中碳的总量,通常占微生物干物质的40%~45%,是反映土壤微生物量大小的重要指标。而土壤MBC对土壤环境的各种变化极为敏感,能充分反映土地利用方式和生态功能的变化,土壤MBC的大小和转化能力直接影响植物对养分的吸收^[25]。War2dle^[26]研究表明,土壤温度、土壤湿度、土壤理化条件以及食物网的交互作用等生态因子可能会影响MBC的大小。朱志建等^[27]研究了不同森林植被下土壤MBC变化情况,结果表明阔叶林土壤微生物量碳含量高于针叶林,其原因是阔叶林每年的植被归还量和分解速度大于针叶林,说明MBC含量受到凋落物含量及其分解速率的影响。胡婵娟等^[25]研究了不同林龄人工刺槐林土壤MBC变化情况,结果表明,随着林龄增加,土壤MBC含量呈逐年增加的趋势。

本研究结果与上述研究结果相似,随着林龄增加,天然油松林MBC含量也逐年增加。主要的原因可能有以下几点。首先,随着天然油松林林龄的增加,林下凋落物逐年积累,这为土壤中的微生物生长和繁殖提供了大量的C源^[28],而在自然演替初期,由于新鲜凋落物分解过程中,需要经过土壤动物的破碎、吃食、消化和排泄后才能为土壤微生物所利用^[29],因此,演替初期土壤MBC增加缓慢。第二,樊军等^[28]研究表明,根系庞大的植被,为土壤提供较多的有机物质,其土壤MBC比小根系植被土壤中高。本研究中,随着林龄的增加,天然油松林的根系逐年增大,同时伴随着灌木和草本等植被多样性的丰富使得自然演替后期的油松林形成庞大的地下根系网,为土壤提供了大量的有机物质供土壤微生物利用,从而造成了天然油松林土壤MBC含量逐年增加。第三,研究证明,生长季内增加1倍降水会导致极地半干旱荒漠生态系统土壤微生物量碳增加^[29]。随着天然油松林自然演替的进行,相对于演替初期,演替后期的油松林以其高大的树冠,较高的郁闭度和庞大的地下根系系统,能够起到良好的保水能力,从而为土壤中

微生物的生长和繁殖提供了有利条件,同时促进了整个森林生态系统中 C、N 等土壤养分的循环,故 MBC 含量通常随着自然演替的进行呈现出逐渐增加趋势。本研究中土壤可培养微生物总数量随林龄的增大呈下降趋势,而土壤 MBC 却逐年上升。究其原因,尽管细菌数量在土壤微生物数量中占据绝对优势,但真菌体积较大。真菌的生物量在整个土壤微生物生物量中所占比例较大^[30]。本研究中真菌数量的逐年增加可能是土壤 MBC 增加的又一原因。

3 结论

(1) 土地利用方式的不同可能是天然油松林土壤微生物组成不同于人工林,而有其独特变化规律的原因之一。不同林龄天然油松林土壤微生物 3 大类群表现出不同变化规律。随着天然油松林演替的发展,细菌、放线菌与真菌在土壤中的数量分布愈加均匀。放线菌数量的变化要比细菌数量的变化对多样性变化的影响大。

(2) 土壤中氮素生理群及纤维素分解菌的数量组成与植被类型和植被的演替阶段密切相关。油松凋落物对土壤环境变化起着极为重要的作用。固氮菌、硝化细菌、氨化细菌和纤维素分解菌数量随天然油松林演替表现出了独特的变化规律,并且这种数量的变化影响到了土壤 C、N 转化及油松的生长和油松林的演替。

(3) 随着天然油松林林龄的增加,林下调落物逐年积累,这为土壤中的微生物生长和繁殖提供了大量的 C 源,在自然演替初期土壤 MBC 增加缓慢。随着林龄的增加,天然油松林的根系逐年增大,为土壤提供了大量的有机物质供土壤微生物利用,从而造成了天然油松林土壤 MBC 含量逐年增加。相对于演替初期,演替后期的天然油松林高大的树冠、较高的郁闭度及庞大的地下根系系统起到了良好的保水能力,为土壤中微生物的生长和繁殖提供了有利条件,促进了土壤 MBC 含量的逐渐增加。真菌的生物量在整个土壤微生物生物量中所占比例较大,其数量的逐年增加可能是土壤 MBC 增加的原因之一。

[参 考 文 献]

[1] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderon F J, et al. Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34 (11): 1592-1611.

[2] Harris J A. Measurements of the soil microbial commu-

nity for estimating the success of Restoration [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54 (4): 801-808.

- [3] Insam H, Hitzl W. Data evaluation of community-level physiological profiles: A reply to letter of Howard [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 1192-1200.
- [4] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 等. 不同森林恢复类型对土壤微生物群落的影响 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (11): 2019-2024.
- [5] 李国雷, 刘勇, 于海群, 等. 油松人工林林下植被发育对油松生长节律的响应 [J]. *生态学报*, 2003, 29 (3): 1264-1275.
- [6] 张希彪, 郭小强, 周天林, 等. 子午岭种子植物区系分析 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 267-274.
- [7] 刘向东, 刘钦孝, 赵鸿雁. 黄土丘陵区人工油松林和山杨林林冠截留作用的研究 [J]. *水土保持通报*, 1991, 11 (1): 47.
- [8] 张社奇, 王国栋, 时新玲, 等. 黄土高原油松人工林地土壤水分物理性质研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23 (1): 60-64.
- [9] 张希彪, 郭小强, 上官周平, 等. 黄土丘陵区子午岭油松天然林群落特征研究 [J]. *植物研究*, 2006, 26(2): 16-175.
- [10] 刘立品. 子午岭木本植物志 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 29-30.
- [11] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 16-163.
- [12] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 176-179.
- [13] 吴金水. 土壤微生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006: 5-59.
- [14] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 3 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 39-399.
- [15] 闵红, 和文祥, 李晓明, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤微生物数量演变特征 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27 (3): 058-0593.
- [16] 刘福德, 孔令刚, 安树青, 等. 连作杨树人工林不同生长阶段林地内土壤微生态环境特征 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22 (2): 12-125.
- [17] 张文婷, 来航线, 王延平, 等. 黄土高原不同植被坡地土壤微生物区系特征 [J]. *生态学报*, 2008, 28 (9): 422-4234.
- [18] 梁健, 王孝安, 陶树兴, 等. 森林演替过程中优势树种凋落叶对土壤微生物组成的影响 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27 (7): 112-1133.
- [19] Menyailo O V. The influence of tree species on the biomass of denitrifying bacteria in gray forest soils [J]. *Soil Biology*, 2007, 3: 33-337.

- 息熵分异规律研究: 以垦利县为例[J]. 国土资源科技管理, 2006, 23(2): 70-73.
- [5] 高永年, 刘友兆. 经济快速发展地区土地利用结构信息熵变化及其动因分析: 以昆山市为例[J]. 土壤, 2004, 36(5): 52-53.
- [6] 谭永忠, 吴次芳. 区域土地利用结构的信息熵分异规律研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 112-117.
- [7] 刘筱非, 周宝同, 杨庆媛, 等. 信息熵在区域土地利用结构研究中的应用: 以重庆市江北区为例[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2004, 29(6): 1062-1065.
- [8] 王宗明, 张柏, 黄素军, 等. 基于 GIS 和信息熵的松嫩平原土地利用结构熵演化分析: 兼论系统无序度、复杂性与多样性[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21(3): 196-200.
- [9] 王秀红, 何书金, 罗明. 土地利用结构综合数值表征: 以中国西部地区为例[J]. 地理科学进展, 2002, 21(1): 17-25.
- [10] 赵晶, 徐建华, 梅安新, 等. 上海市土地利用结构和形态演变的信息熵与分维分析[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 137-146.
- [11] 童绍玉, 蔡运龙, 李双成. 云南省楚雄市与双柏县土地利用变化对比研究[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 392-406.
- [12] 匡文慧, 张树文. 长春市百年城市土地利用空间结构演变的信息熵与分形机制研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(1): 73-80.
- [13] 陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分维数[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 146-152.
- [14] 何祖慰, 杨忠, 罗辑. 西藏昌都地区土地利用结构熵值时序分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(2): 192-195.
- [15] 陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分维数[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 146-152.
- [16] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 33-34.
- [17] 范建刚. 1983-2004 年陕西粮食产量和主要投入要素的灰色关联分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 209-212.
- [18] 陈登荣. 浅析阆中市的水土流失及其防治对策[OL]. [2007-12-16]. <http://www.cjstbc.com/POP/article/74/3068.html>.
- [19] 张希彪. 陇东黄土高原土地利用/覆盖变化及驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 142-147.
- [20] 冶青. 近现代阆中交通与经济区位的边缘化[J]. 西华师范大学学报: 哲学社会科学版, 2006(5): 62-72.

(上接第 48 页)

- [20] 杜国坚, 张庆荣, 洪利兴, 等. 杉木连栽地土壤微生物区系及其生化特性和理论性质的研究[J]. 浙江林业科技, 1995, 15(5): 142-20.
- [21] 于学珍, 路葵, 李秀艳, 等. 天童常绿阔叶林退化过程中土壤微生物主要类群变化特性研究[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4): 612-64.
- [22] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍, 等. 大青山一二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 267-273.
- [23] 张丽萍, 张兴昌, 刘增文, 等. 人工林凋落叶分解对土壤性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(9): 87-92.
- [24] 邓若磊, 徐海荣, 曹云飞, 等. 植物吸收铵态氮的分子生物学基础[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 512-519.
- [25] Gil Sotres F, Trasar Cepeda C, Leir s M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 877-887.
- [26] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. Biological Reviews, 1992, 67: 322-358.
- [27] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523-526.
- [28] 樊军, 郝明德. 长期轮作施肥对土壤微生物碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 10(1): 85-87.
- [29] Illeris L, Michelsen A, Jonasson S. Soil plus root respiration and microbial biomass following water, nitrogen and phosphorus application at a high arctic semi desert [J]. Biogeochemistry, 2003, 65(1): 15-29.
- [30] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-58.