

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021022801

孔涛, 郑爽, 夏宗伟, 等. 沙地不同林龄樟子松人工林土壤微生物量特征[J]. 环境化学, 2022, 41(6): 2035-2043.

KONG Tao, ZHENG Shuang, XIA Zongwei, et al. Characteristics of soil microbial biomass in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different ages in sandy land[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (6): 2035-2043.

沙地不同林龄樟子松人工林土壤微生物量特征*

孔涛¹ 郑爽¹ 夏宗伟^{2**} 王双³ 刘爽³
朱肃⁴ 孙溥璠¹ 刘紫薇¹

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 阜新, 123000; 2. 临沂大学 资源环境学院, 临沂, 276000; 3. 辽宁铁岭县自然资源事务服务中心, 铁岭, 112799; 4. 铁岭市自然资源事务服务中心, 铁岭, 112008)

摘要 为揭示不同林龄沙地樟子松人工林土壤微生物性质的变化规律, 选择 10、20、30、40、50、60 a 生科尔沁沙地樟子松人工林为研究对象, 测定分析了土壤微生物量碳 (MBC)、土壤微生物量氮 (MBN)、土壤呼吸强度、土壤微生物量碳氮比 (MBC/MBN)、土壤微生物碳、氮熵等特征的变化。结果表明, 随林龄增加, MBC 和 MBN 均先增大后平稳再下降, 二者最大值分别出现在 40 a 和 50 a; 土壤呼吸强度、土壤微生物碳、氮熵都呈现出上升-下降-上升-下降的变化趋势, 且各指标均在 60 a 最小, 表明过熟林微生物性质恶化; MBC/MBN 先维持稳定, 后期大幅度增大, 在 60 a 时达到最大。随着土层深度增加, MBC、MBN 及呼吸强度呈现表聚性; 土壤微生物碳、氮熵呈现出先增后减的变化规律, 深层 MBC/MBN 大于表层土壤。微生物各指标与樟子松人工林地上部分存在正相关关系, 与全磷呈显著正相关关系。冗余分析表明, 全磷、有机碳对不同林龄樟子松林下土壤微生物量影响显著。综上所述, 樟子松近熟林和成熟林期微生物各指标达到最佳, 过熟林时微生物活性差。

关键词 风沙地, 樟子松人工林, 林龄, 微生物量。

Characteristics of soil microbial biomass in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different ages in sandy land

KONG Tao¹ ZHENG Shuang¹ XIA Zongwei^{2**} WANG Shuang³ LIU Shuang³
ZHU Su⁴ SUN Pufan¹ LIU Ziwei¹

(1. College of Environmental Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000, China; 2. School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, 276000, China; 3. Liaoning Tieling County Natural Resources Affairs Service Center, Tieling, 112799, China; 4. Tieling Natural Resources Affairs Service Center, Tieling, 112008, China)

Abstract To reveal the changing laws of soil microbial properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation with different ages in sandy land, we determined and analyzed the changes of soil microbial biomass C(MBC) and N(MBN), soil respiratory intensity, soil microbial biomass C/N(MBC/MBN), soil microbial quotient and other characteristics changes in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations at 10, 20, 30, 40, 50, and 60 a in Horqin sandy land. The results showed that with the increase of forest age, both MBC and MBN first increased, then remained stable and finally decreased, and the maximum values of the two respectively appeared at 40 a and 50 a; The soil

2021 年 2 月 28 日收稿(Received: February 28, 2021).

* 国家自然科学基金 (31770531) 和辽宁省高等学校基本科研项目 (LJ2017QL015) 资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (31770531) and Basic Scientific Research Projects of Colleges And Universities in Liaoning Province (LJ2017QL015).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 15104040619, E-mail: zwxia0000@163.com

respiratory intensity, soil microbial carbon and nitrogen entropy all showed a change trend of increased—decreased—increased—decreased, and the minimum values of each index appeared at 60 years, indicating that the microbial properties of the over-mature stand have deteriorated; MBC/MBN remained stable at first, then increased substantially, and reached its maximum at 60 years. As the soil depth increased, MBC, MBN and respiratory intensity showed the surface aggregation; the change law of microbial quotient increased first and then decreased, and MBC/MBN of deep soil was greater than that of surface soil. Microbial indicators had a positive correlation with the above—ground part of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation, and had a significant positive correlation with total phosphorus. Redundancy analysis showed that TP and SOC had significant effects on soil microbial biomass at different stand ages of *P. sylvestris* var. *mongolica*. The microbial indicators reached the best in near—mature and mature stand, and its microbial activity was poor in over—mature stand.

Keywords sandy land, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation, stand age, microbial biomass.

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国“三北”地区营建防护林的优良树种,具有适应性强、耐寒耐旱、根系发达等特性.因其可以将土壤中的水分紧紧留住,固定沙丘的流动从而起到防风固沙作用,在辽西北章古台地区有着大面积的栽植.近年来,学者们分别从土壤水分^[1]、土壤养分^[2]、土壤物理性质^[3-4]、土壤酶活性^[5-6]等方面对樟子松人工林的合理经营进行了研究.

土壤微生物作为土壤有机及无机复合体的组成部分,在森林生态系统的物质循环和能量流动中具有明显促进作用^[7].土壤微生物易受到环境条件的影响而发生变化,能产生快速灵敏的响应^[8-10],其中土壤微生物量通常可以反映土壤肥力状况.土壤微生物量主要包括土壤微生物量碳、氮、磷、硫,与土壤有机质、全氮等养分指标存在相关性^[11].土壤微生物量碳(MBC)能够体现土壤中有机碳的活性,周转周期较短,可以较为敏捷地指示土壤环境的细微变化,可用于预测土壤有机质早期变化^[12].而土壤微生物量氮(MBN)作为土壤氮素的贮藏库,具有较强的活跃性,能够参与土壤氮素循环转化^[13].土壤呼吸强度可以反映土壤微生物的活性,土壤呼吸作用影响大气碳循环,在土壤碳源输送中扮演着重要角色^[14].通过土壤呼吸所释放的 CO₂ 既可以作为土壤植物和动物的活性指标,还可以检测土壤肥力和土壤透气性^[15].因而土壤微生物可以作为评估土壤质量及肥力变化最为敏感同时也最具潜力的指标^[16-17].

目前,国内外关于森林生态系统对土壤微生物的影响多集中于土地利用类型^[18]、森林类型^[19-20]和林木根系^[21]方面.对于樟子松人工林,李陆平等^[22]研究了幼林龄到中龄林下土壤微生物类群(细菌、真菌、放线菌)数量变化特征.林雅超等^[23]研究了中龄林和成熟林下樟子松土壤微生物量动态变化规律.然而对樟子松人工林全生育周期(幼龄林到过熟林)下土壤微生物特性尚未系统开展.本文对不同林龄樟子松人工林土壤微生物量碳、氮、土壤呼吸变化规律进行研究,可为人工林经营管理提供科学基础.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南缘的辽宁省阜蒙县彰武台镇樟子松试验示范林(42°43′—42°51′N, 121°53′—122°22′E).属典型的温带半干旱半湿润气候区的季风大陆性气候,年均气温为 7.9℃,最高温度 38.3℃,最低温度-34.4℃,昼夜温差大,全年四季变化明显,且雨热同期.平均风速 3.8 m·s⁻¹,最大风速 30 m·s⁻¹,年均降水量 497 mm,年均蒸发量 1450 mm,蒸发量大于降水量,平均无霜期 156 d.该地土壤类型为风沙土,抗风、抗旱的沙生植物为优势种.

1.2 样地选择及样品采集

在樟子松人工林勘查的基础上,选取地形、气候、水文、土壤质地等立地条件相对均一地段,分别选取林龄为 10 a、20 a、30 a、40 a、50 a 和 60 a 的樟子松人工林(表 1).根据国家林业行业标准中主要树种龄级与龄组划分(LY/T 2908—2017)^[24]及樟子松人工林生长特性,本研究将其龄期划分为幼龄林(10 a、20 a)、中龄林(30 a)、近熟林(40 a)、成熟林(50 a)和过熟林(60 a).选择荒草沙地作为对照

(CK), 各林龄分别设置 4 块 20 m×20 m 的标准地. 2018 年 8 月, 采用 S 形取样法, 每个标准地中布设 10 个取样点, 用土钻分别取 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 的 5 个深度的土样. 将同一土层样品混合均匀后过 0.25 mm 筛, 剔除杂质装入塑封袋放入冰箱待测.

表 1 标准地基本情况

Table 1 Basic overview of the plots						
样地 Plot	Z10	Z20	Z30	Z40	Z50	Z60
林龄/a Tree age	10	20	30	40	50	60
密度/(plants·hm ⁻²) Density	625	625	675	675	650	650
树高/m Height	3.28	7.80	9.25	11.27	11.01	13.04
胸径/cm DBH	7.50	13.31	16.69	20.92	19.61	20.59
东西平均冠幅/m <i>W_{ew}</i>	2.59	3.6	4.01	4.3	4.59	4.62
南北平均冠幅/m <i>W_{sn}</i>	2.42	4.21	4.10	4.69	4.72	4.92
枯落物厚度/cm Litter depth	8.11	10.04	12.67	16.89	16.66	13.11
郁闭度 Canopy density	0.5	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6
有机碳/(g·kg ⁻¹) SOC	5.96	5.96	8.85	8.31	10.73	11.16
全氮/(g·kg ⁻¹) TN	0.26	0.24	0.16	0.21	0.24	0.27
碱解氮/(mg·kg ⁻¹) HN	7.25	4.77	2.54	4.89	7.30	6.97
全磷/(g·kg ⁻¹) TP	0.92	1.0	1.11	1.12	1.04	1.01
有效磷/(mg·kg ⁻¹) AP	10.52	4.59	7.94	6.33	4.74	6.41

注: Z10、Z20、Z30、Z40、Z50、Z60分别为10年生、20年生、30年生、40年生、50年生和60年生樟子松人工林.
Note: Z10, Z20, Z30, Z40, Z50, Z60 were respectively 10, 20, 30, 40, 50, and 60 a *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations.

1.3 测定方法

土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸浸提法测定, 对土壤分别进行熏蒸处理和未熏蒸处理, 利用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液进行浸提^[25]. 土壤微生物量碳(MBC)和土壤微生物量氮(MBN)分别用下式计算^[26]:

MBC = E_C / K_{EC}

MBN = E_N / K_{EN}

式中, E_C 、 E_N 分别为熏蒸和未熏蒸土样之差; K_{EC} 、 K_{EN} 分别为氯仿熏蒸杀死的微生物体中碳、氮被浸提出来的比例, K_{EC} 一般取 0.38, K_{EN} 一般取 0.45^[26-27].

土壤微生物碳、氮熵计算公式如下:

土壤微生物碳熵 = MBC / SOC

土壤微生物氮熵 = MBN / TN

土壤养分指标按照鲍士旦编著的《土壤农化分析》^[28] 进行测定. 其中, 土壤有机碳采用重铬酸钾-稀释热法, 土壤全氮采用凯式定氮法, 土壤碱解氮采用碱解扩散法, 土壤全磷采用浓 H₂SO₄ 消煮-钼锑抗比色法, 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法. 土壤呼吸强度采用室内密闭培养 NaOH 碱液吸收法, NaOH 的浓度为 0.1 mol·L⁻¹, 恒温培养 24 h^[29].

1.4 数据分析

各指标测定后所获得的数据转化为风干土计算. 运用 SPSS 22.0 软件中的单因素方差分析和 Duncan 模型进行显著性检验($P < 0.05$); 相关性分析利用 Pearson 检验; 聚类分析采用系统聚类法; 冗余分析(Redundancy analysis, RDA)利用 Canoco 5.0 软件分析.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 不同林龄、不同土层樟子松人工林土壤微生物性质描述性统计特征

对不同林龄、不同土层樟子松人工林土壤微生物指标进行经典统计分析, 计算各指标变异系数, 划分土壤微生物指标的变异程度. MBC、MBN、土壤 24 h 呼吸强度的变化范围分别为 246.19—82.41 、

11.39—2.71、3.22—1.19 mg·kg⁻¹, 平均值分别为 165.19、5.96、1.92 mg·kg⁻¹. MBC/MBN、土壤微生物碳熵、土壤微生物氮熵的变化范围分别为 64.90%—18.17%、2.84%—1.44%、5.92%—1.26%, 平均值分别为 30.31%、1.99%、2.98%. 不同微生物量指标的变异程度各不相同, 其变异程度大小依次为 MBN>土壤微生物氮熵>MBC/MBN>土壤呼吸强度>MBC>土壤微生物碳熵, 指标变异范围为 15.08%—30.70%.

2.2 不同林龄樟子松人工林土壤微生物量碳氮及土壤呼吸强度特征

不同林龄、不同土层土壤 MBC、MBN、土壤呼吸强度特征如表 2 所示. 在垂直方向上, 荒草沙地 (CK) 与樟子松人工林林下土壤 MBC、MBN 含量及土壤呼吸强度均呈现表聚性. 不同林龄樟子松人工林土壤 MBC、MBN 含量随着林龄增加总体呈现出先升高后平稳再下降的变化趋势, 这与杨涛等^[30]的研究结果相一致. 樟子松林下土壤 MBC 含量显著高于荒草沙地 (CK), 10 a、20 a、60 a 土壤 MBN 含量与荒草沙地差异不显著, 30—50 a MBN 含量与其他林龄间具有显著性差异. 在 40 a 时 MBC 含量达到最大值 209.27 mg·kg⁻¹, 而 MBN 峰值则出现在 50 a 时, 为 8.21 mg·kg⁻¹. 上述结果表明幼龄期植物凋落物输入较低, 对土壤养分的需求量较多. 中龄期自疏作用会使冠层的郁闭度降低, 光照增强, 土壤微生物的繁殖速率有所增加^[31]. 土壤呼吸强度随林龄增加先增大后减小, 荒草沙地土壤呼吸强度大于 10 a, 与 20 a 间无显著性差异. 原因主要为土壤呼吸的强弱与微生物性质及对养分利用情况有关^[32], 樟子松林下枯落物 C/N 较荒草沙地枯落物高, 而 C/N 比较高的枯落物分解较慢^[33], 且草本植物枯落物分解速率明显高于木质植物, 因此营林初期樟子松土壤呼吸速率不高. 60 a 时土壤呼吸强度减弱可能是受到成熟林期樟子松冠幅较大的影响使林下土壤温度偏低, 低温不利于枯落物的分解^[34], 导致呼吸作用减弱.

表 2 不同林龄土壤微生物量碳、土壤微生物量氮、土壤呼吸强度特征

Table 2 Characteristics of MBC, MBN and soil respiration intensity with different stand ages

土壤微生物指标 Soil microbial indexes	土层 深度/cm Soil depth	林龄/a Stand ages						
		CK	10	20	30	40	50	60
土壤微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	0—20	60.74 Da	133.83 Ca	158.17 Ba	206.76 ABa	246.19 Aa	242.91 Aa	206.48 ABa
	20—40	41.09 Db	103.09 Cb	142.30 Ba	186.63 ABb	213.49 Aab	207.70 Ab	191.31 Aab
	40—60	32.43 Db	98.61 Cbc	117.25 Cb	171.33 Bb	206.68 Ab	201.60 Ab	174.25 Bb
	60—80	32.51 Db	95.86 Cbc	100.65 Cb	163.76 Bb	194.37 Ab	186.05 Ac	175.83 ABb
	80—100	32.60 Db	82.41 CDc	88.54 Cc	141.42 Bc	185.63 Ab	172.87 Ac	159.72 ABc
	0—100	39.87 Db	102.76 Cb	121.38 Cb	173.98 Bb	209.27 Ab	202.23 ABb	181.52 ABb
土壤微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	0—20	4.72 Ca	4.85 Ca	6.72 ABa	11.39 Aa	10.08 Aa	10.23 Aa	5.43 Ba
	20—40	4.40 Ca	4.28 Ca	5.94 BCb	9.47 Ab	7.56 Bb	9.04 Aab	4.78 Cb
	40—60	2.73 Cb	3.24 Cb	4.84 Bbc	7.39 Abc	6.88 ABb	7.63 Ac	3.27 Cbc
	60—80	2.27 Cb	3.78 BCb	4.41 Bc	5.29 Bc	6.48 ABb	8.22 Ab	2.71 Cc
	80—100	2.68 Bb	2.71 Bc	3.27 Bc	5.26 Ac	4.85 Ac	5.95 Ac	2.72 Bc
	0—100	3.36 Bab	3.77 Bb	5.04 Bb	7.76 Abc	7.17 Ab	8.21 Ab	3.78 Bbc
土壤呼吸 强度/(mg·kg ⁻¹ ·24h ⁻¹)	0—20	2.28 Ba	1.70 Ca	2.30 Ba	3.22 Aa	1.55 Ca	3.03 Aa	1.62 Ca
	20—40	2.19 ABa	1.44 Bb	2.19 ABa	2.60 Ab	1.21 Cb	2.63 Ab	1.47 Bab
	40—60	1.92 ABab	1.46 Bb	1.94 ABb	2.38 Abc	1.19 Cb	2.94 Aa	1.22 Cb
	60—80	1.92 Bab	1.70 Ba	2.23 Aa	2.14 ABc	1.21 Cb	2.46 Ab	1.23 Cb
	80—100	1.69 Bb	1.22 Cc	1.72 Bc	2.61 Ab	1.45 BCab	2.44 Ab	1.24 Cb
	0—100	2.00 Ba	1.50 Cab	2.07 Bab	2.59 Ab	1.33 Cb	2.70 Aa	1.36 Cb

注: 不同大写字母表示同一土层不同林龄间差异显著, 不同小写字母表示同一林龄不同土层间差异显著(下同).
Note: Different capital letters indicate significant differences between different stand ages in the same soil layer, and different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers of the same stand age (the same below).

2.3 不同林龄樟子松人工林土壤微生物量碳氮比及土壤微生物熵特征

不同林龄、不同土层土壤 MBC/MBN、土壤微生物碳、氮熵特征如表 3 所示. MBC/MBN 总体上呈

现出随着土层加深而增大的趋势. 林下土壤 MBC/MBN 在各土层处均显著大于 CK, 表明在从荒草沙地到林地转变过程中, MBC/MBN 显著提高. 10—50 a 樟子松人工林土壤 MBC/MBN 无显著性差异, 其均值在 20—40 范围内, 60 a 时大幅上升, 均值达到 50.99. 表明由成熟林向过熟林转变过程中, MBC/MBN 再次大幅提高. 在这两个转变过程中, 土壤微生物群落中真菌比例大幅提高, 这与牛小云等^[35]、李陆平等^[22] 提出的真菌数量随林龄增大而增多结果一致. 原因在于, 其一, 林地木质类枯枝落叶较荒草沙地丰富, 纤维素是枯落物理化性质的代表物, 分解纤维素导致真菌富集^[36], 因此林地 MBC/MBN 高于荒草沙地; 其二, 过熟林樟子松病害变多, 而植物的病害多为真菌病害, 因此 MBC/MBN 提高^[37].

表 3 不同林龄土壤微生物量碳氮比、土壤微生物碳熵、土壤微生物氮熵特征

Table 3 Characteristics of soil MBC/MBN, microbial C quotien and microbial N quotient with different stand ages

土壤微生物指标 Soil microbial indexes	土层 深度/cm Soil depth	林龄/a Stand ages						
		CK	10	20	30	40	50	60
土壤微生物量碳氮比 MBC/MBN	0—20	12.86 Da	27.60 ABa	23.58 Bb	18.17 Cc	24.42 Bc	23.82 Bb	38.03 Ab
	20—40	9.33 Db	24.08 Bb	23.97 Bab	19.72 Cc	28.25 Bb	22.96 Bb	40.00 Ab
	40—60	11.87 Db	30.42 Ba	24.22 Ca	23.18 Cbc	30.03 Bb	26.44 BCa	53.24Aab
	60—80	14.29 Da	25.35 BCb	22.82 Cb	30.93 Ba	30.00 Bb	22.65 Cb	64.90 Aa
	80—100	12.17 Da	30.42 BCa	27.04 Ca	26.87 Cb	38.31 Ba	29.04 BCa	58.81 Aa
	0—100	12.11 Ca	27.58 Ba	24.33 Ba	23.77 Bbc	30.20 Bb	24.98 Bb	50.99 Aab
土壤微生物碳熵/% Soil microbial C quotien	0—20	0.57 Ca	1.97 Ba	2.48 Aa	2.50 Aa	2.84 Aa	2.35 Aa	1.78 Ba
	20—40	0.43 Ca	1.98 ABa	2.55 Aa	2.17 Aa	2.52 Aa	1.77 Bab	1.71 Ba
	40—60	0.35 Cb	1.93 ABa	1.96 Aab	1.73 Bb	2.58 Aa	1.93 ABa	1.73 Ba
	60—80	0.36 Cb	1.52 BCb	1.72 Bb	1.92 ABa	2.33 Ab	1.69 Bb	1.61 Bb
	80—100	0.38 Cb	1.48 Bb	1.59 Bb	1.71 ABb	2.44 Aab	1.68 Bb	1.44 Bb
	0—100	0.42 Da	1.78 BCab	2.06 Bab	2.01 BCa	2.54 Aa	1.88 BCa	1.66 Cab
土壤微生物氮熵/% Soil microbial N quotien	0—20	1.39 Cc	1.41 Cb	2.26 Ba	5.44 Aa	3.85 ABa	3.12 ABb	1.51 Cb
	20—40	1.83 BCab	1.71 Ca	2.35 Ba	5.92 Aa	4.01 ABa	4.63 Aa	1.85 BCa
	40—60	1.61 Cb	1.34 Db	2.31 BCa	5.65 Aa	3.76 Ba	3.92 Bb	1.60 Cb
	60—80	1.62 BCb	1.86 BCa	2.13 Bab	3.89 Ab	3.52 ABa	4.50 Aa	1.26 Cc
	80—100	2.23 Ba	1.38 Cb	1.80 BCb	4.60 Aab	3.06 ABb	3.38 ABb	1.34 Cc
	0—100	1.74 Cb	1.54 Cb	2.17 Cab	5.10 Aa	3.64 Ba	3.91 Bb	1.51 Cb

土壤微生物碳熵和氮熵可以反映土壤微生物量对土壤营养库的贡献程度, 熵值越高, 微生物所固定的养分就越多^[38]. 土壤微生物碳熵与氮熵都用百分号来表示, 可以有效避免因对不同土壤类型有机碳含量差异而导致的问题^[39]. 土壤微生物碳熵、氮熵均随土壤深度的增加而不断减小, 最大碳熵值出现在 0—20 cm 土层处, 最大氮熵值则出现在 20—40 cm 土层处. 表明表层土单位数量有机碳、氮能维持的微生物生物量高, 微生物活性强.

林地土壤微生物碳、氮熵显著大于荒草沙地, 原因在于林地中枯落物积累量多, 能够为土壤提供更加充足的营养, 使土壤微生物变得更加活跃^[40]. 本研究发现土壤微生物碳、氮熵均随林龄的不断增加呈现出 M 型曲线变化, 幼龄林和过熟林熵值低. 表明幼龄林和过熟林固碳固氮能力弱, 成熟林土壤微生物量活性较强. 土壤微生物碳熵在 40 a 时达到最大, 与其他林龄间具有显著性差异; 土壤微生物氮熵在 30 a 达到最大, 与其他林龄间差异显著.

土壤微生物碳、氮熵受土壤类型、气候等因素影响, 土壤微生物碳熵变化范围一般为 0.27%—7.0%^[41]. 微生物碳熵较大, 说明土壤微生物的活性较高, 加快了有机碳的周转速率. 本研究中土壤微生物碳熵在各林龄之间变化范围较小, 为 1.66%—2.84%; 土壤微生物氮熵在各林龄之间的变化范围较大, 为 1.51%—5.10%, 其最小值均低于且最大值均大于温带森林土壤微生物碳熵(1.8%—2.8%)与氮熵(3.4%—5.9%)^[42]. 结果可能是由于本研究林龄跨度大, 土壤类型、管理措施以及土壤样本采集

的时间有所不同,因此土壤微生物碳、氮熵范围较大.

2.4 各个指标在不同林龄、不同土层的系统聚类分析

对不同林龄及土层的 6 个微生物指标进行聚类分析,结果如图 1 所示.从图 1(a)可看出,分析结果将林龄分为 4 类.第一类为 10 a 和 20 a,此时樟子松均为幼龄林期,樟子松人工林在生长初期大量吸收土壤养分,导致土壤生境的稳定性逐渐减弱;第二类中 30 a 处于中龄林,此时林木之间存在着对光、水以及养分等较为激烈的竞争;第三类为 40 a 和 50 a,樟子松人工林处于稳定生长的成熟期,对土壤养分需求量基本趋于稳定,土壤微生物量有所积累;第四类为 60 a,此时樟子松林已进入过熟林阶段,土壤微生物性质减弱.图 1(b)是对不同土层进行聚类分析.第一类是 0—20 cm,第二类是 20—40 cm、40—60 cm 和 60—80 cm,第三类是 80—100 cm. 0—20 cm 土层水热条件较好,更接近腐殖质层,土壤性质相近,为一类;80—100 cm 属于底层土,可供土壤吸收利用的养分含量有所降低,为一类.从分类结果看出,林龄和土层对土壤微生物性质具有不同程度的影响,且该结果与前面所得结论即 6 个微生物指标的变化特征基本一致.

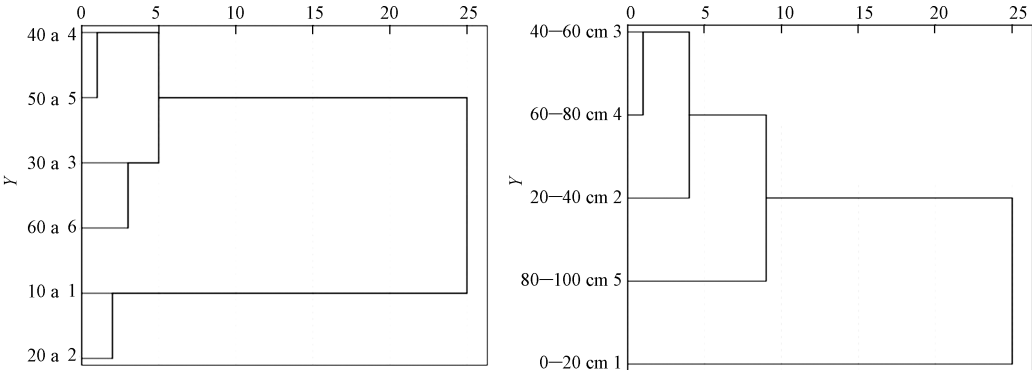


图 1 不同林龄、不同土层样地聚类分析树状图

Fig.1 Cluster analysis tree diagram of different stand ages and different soil samples

2.5 微生物指标影响因素分析

土壤微生物指标与樟子松人工林地上与地下因素的相关性分析见表 4.从微生物与养分关系角度上,总体上,微生物指标与 AP 均未表现出显著相关性;除土壤微生物氮熵外,其他微生物指标与 TN、HN 养分相关性不显著;MBC、MBC/MBN 与 SOC 显著正相关;除 MBC/MBN 外,剩余微生物指标与 TP 极显著正相关,表明 TP 是影响微生物指标的主要因素.从微生物指标与樟子松生长指标关系角度,MBC 与生长指标均极显著正相关;MBN 与胸径、冠幅显著正相关;MBC/MBN 与株高极显著正相关;土壤微生物氮熵与胸径显著正相关,表明 MBC 与 MBN 对樟子松的生长发育有显著的促进作用.

表 4 土壤微生物指标与环境因素的相关性(n=360)

Table 4 Correlation between soil microbial indexes and environmental factors (n=360)

指标 Indexes	株高Heigh	胸径 Diameter	冠幅Crown	有机碳 SOC	全氮 TN	碱解氮 HN	全磷 TP	有效磷 AP
土壤微生物量碳 MBC	0.748**	0.816**	0.743**	0.685**	0.215	0.253	0.604**	-0.303
土壤微生物量氮 MBN	0.284	0.390*	0.354*	0.314	0.129	0.134	0.543**	-0.258
土壤呼吸强度 Soil respiratory intensity	0.012	0.114	0.124	-0.100	0.178	0.108	0.478**	-0.218
土壤微生物碳熵 Soil microbial C quotient	0.103	0.201	0.141	-0.273	0.051	0.021	0.459**	-0.066
土壤微生物量碳氮比 MBC/MBN	0.427**	0.323	0.309	0.347*	-0.009	0.050	-0.132	0.143
土壤微生物氮熵 Soil microbial N quotient	0.260	0.376*	0.319	0.173	-0.508**	-0.429**	0.686**	-0.144

注: *表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$).
Note: *indicates significant correlation ($P < 0.05$), **indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

采用冗余分析(RDA)可以更好地揭示不同林龄和不同土层深度樟子松人工林土壤微生物指标与土壤养分指标之间的相关关系,结果如图 2 所示.第一排序轴和第二排序轴解释了土壤微生物指标与

土壤养分关系总变异的 98.67%, 其中第一排序轴可以解释各指标与土壤养分总变异的 79.22%, 第二排序轴能解释微生物指标与土壤养分变异的 19.45%. MBC、MBN、土壤呼吸强度总体与土壤 TP、SOC 呈较为显著的正相关, 与 AP 呈负相关. 从箭头的连线长度可以看出其对土壤微生物指标的影响程度, TP、SOC 对不同林龄样地微生物指标的影响较大, 其中 TP 对变异的解释度为 63.3%. 林龄为 10 a、20 a、60 a 的樟子松人工林与土壤微生物指标间的相关性不强, 由此进一步反映出幼龄林与过熟林土壤养分水平不高.

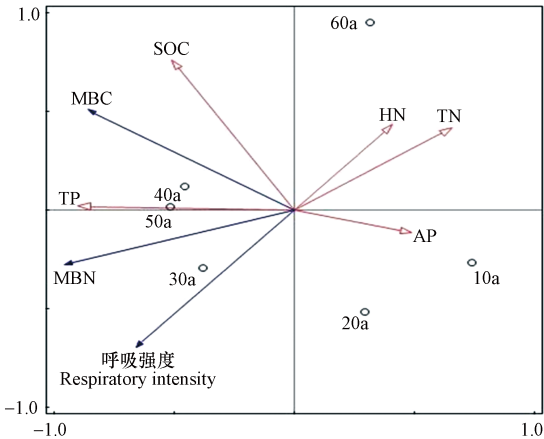


图 2 土壤微生物指标与土壤养分的 RDA 排序图

MBC 为土壤微生物量碳, MBN 为土壤微生物量氮; SOC 为土壤有机碳, TN 为土壤全氮, HN 为土壤碱解氮, TP 为土壤全磷, AP 为土壤速效磷; 10 a、20 a、30 a、40 a、50 a、60 a 为林龄; 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 分别为土层 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm.

Fig.2 RDA sorting diagram on soil microbial indexes and soil nutrients

MBC:Soil microbial biomass C, MBN:Soil microbial biomass N; SOC:Soil organic carbon, TN:Soil total nitrogen, HN:Soil alkali—decomposed nitrogen, TP:Soil total phosphorus, AP:Soil available phosphorus; 10 a, 20 a, 30 a, 40 a, 50 a, 60 a are the stand ages; 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 are the soil layers 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm respectively.

3 结论(Conclusion)

随着土层深度增加, 土壤 MBC、MBN 及土壤呼吸强度呈现表聚性. 原因在于林地浅层土壤距离腐殖质层最近, 能更有效地利用水分及养分. 土壤氧气含量随土壤垂直深度增加而减少, 氧气含量越大, 为土壤微生物提供的可降解底物越多, 更能促进土壤微生物活性. 深层土氧气含量较少, 好氧微生物活动耗氧导致氧化还原电位下降, 抑制了土壤微生物的活性, 呼吸作用减弱. 土壤微生物熵随着土层深度增加呈现出“先增后减”的变化规律. 深层土壤 MBC/MBN 大于表层土壤, 因 MBC/MBN 能反映真菌和细菌的占比状况, 真菌所占比例越大, 其 MBC/MBN 则越大. 所以表层土壤真菌比例相对较小, 对枯落物的分解能力相对较弱. 通过相关关系表明 SOC 与 MBC/MBN 显著正相关, 因此需要施入有机肥以提高表层覆盖物的降解能力.

樟子松在近熟林和成熟林期土壤微生物性质最佳, 而过熟林土壤微生物各指标显著下降. 由此表明近熟林和成熟林根系分泌物及凋落物有所积累, 为土壤微生物新陈代谢和自身合成提供了较多的能量来源, 土壤微生物量持续增加. 过熟林期由于樟子松出现衰退现象, 死亡率和病害率增加, 土壤性质恶化, 导致土壤微生物量下降.

参考文献 (References)

[1] 魏晓婷, 雷泽勇, 韩辉. 章古台沙地不同林龄樟子松人工林土壤水分研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(06): 115-121.
WEI X T, LEI Z Y, HAN H. Soil moistures characteristics of different- aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forests in Zhanggutai sandy area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(06): 115-121 (in Chinese).
[2] 张日升. 章古台沙地针叶人工林对土壤养分的影响 [J]. 防护林科技, 2016(12): 10-12.
ZHANG R S. Effects of coniferous plantations in Zhanggutai sandland on soil nutrients [J]. Protection Forest Science and Technology, 2016(12): 10-12 (in Chinese).

- [3] 段民福, 廖超英, 孙长忠, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律 [J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 188-192.
- DUAN M F, LIAO C Y, SUN C Z, et al. Spatio-temporal variabilities of soil physical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forest in Mu Us desert [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(3): 188-192(in Chinese).
- [4] 牛沙沙, 周永斌, 刘丽颖, 等. 不同林龄樟子松人工林土壤理化性质 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(2): 47-50, 62.
- NIU S S, ZHOU Y B, LIU L Y, et al. Soil Properties in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation of Different Ages [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2): 47-50, 62(in Chinese).
- [5] 赵燕娜, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地不同林龄樟子松人工林土壤酶活性变化特征 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 1-5, 19.
- ZHAO Y N, LIAO C Y, LI X M, et al. Evolution of soil enzyme activities of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at different ages in muus sandland [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 1-5, 19(in Chinese).
- [6] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子 [J]. 干旱区研究, 2019, 36(03): 621-629.
- YU D L, LEI Z Y, ZHANG Y S, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(03): 621-629(in Chinese).
- [7] LEGAY N, CLÉMENT J C, GRASSEIN F, et al. Plant growth drives soil nitrogen cycling and N-related microbial activity through changing root traits [J]. Fungal Ecology, 2020, 44: 100910.
- [8] KHAN A G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2005, 18(4): 355-364.
- [9] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局 [J]. 生态学报, 2010, 30(12): 3135-3143.
- LIU S, WANG C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3135-3143(in Chinese).
- [10] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(01): 247-259.
- WANG B R, YANG J J, AN S S, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(01): 247-259(in Chinese).
- [11] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
- XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 89-96(in Chinese).
- [12] 李陆平, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林对土壤微生物及酶活性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 12-16.
- LI L P, LIAO C Y, LI X M, et al. Effects on soil microorganism and enzyme activities of artificial *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in muus sand land [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 12-16(in Chinese).
- [13] 仇少君, 彭佩钦, 刘强, 等. 土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(4): 443-448.
- QIU S J, PENG P Q, LIU Q, et al. Soil microbial biomass nitrogen and its role in nitrogen cycling [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(4): 443-448(in Chinese).
- [14] 严俊霞, 秦作栋, 李洪建, 等. 黄土高原地区柠条人工林土壤呼吸 [J]. 林业科学, 2010, 46(3): 1-8.
- YAN J X, QIN Z D, LI H J, et al. Soil respiration characters in a *Caragana* plantation in loess plateau region [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(3): 1-8(in Chinese).
- [15] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 176-182.
- LIU E K, ZHAO B Q, LI X Y, et al. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 176-182(in Chinese).
- [16] BURTON J, CHEN C R, XU Z H, et al. Soil microbial biomass, activity and community composition in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(7): 1267-1277.
- [17] ROVIRA P, JORBA M, ROMANYÀ J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(4): 355-369.
- [18] MORENO J L, TORRES I F, GARCÍA C, et al. Land use shapes the resistance of the soil microbial community and the C cycling response to drought in a semi-arid area [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 1018-1030.
- [19] BARGALI K, MANRAL V, PADALIA K, et al. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India [J]. CATENA, 2018, 171: 125-135.
- [20] 林允伟, 金光泽. 冻融期去根处理对小兴安岭6种林型土壤微生物量的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6159-6169.
- LIN Y W, JIN G Z. Effects of root resectioning on soil microbial biomass in six forest types in the Xiaoxing'an Mountains during freezing-thawing cycles [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6159-6169(in Chinese).
- [21] 丁令智, 满秀玲, 肖瑞晗, 等. 寒温带森林根际土壤微生物量碳氮含量生长季内动态变化 [J]. 林业科学, 2019, 55(7): 178-186.
- DING L Z, MAN X L, XIAO R H, et al. Dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the soil of rhizosphere during growing season in the cold temperate forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 178-186(in Chinese).
- [22] 李陆平, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤微生物数量变化 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 157-160.
- LI L P, LIAO C Y, LI X M, et al. Changes of soil microorganism of artificial *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Mu Us sandland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 157-160(in Chinese).
- [23] 林雅超, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林土壤理化性质与微生物生物量的动态变化 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1445-1454.
- LIN Y C, GAO G L, DING G D, et al. Dynamics of soil physicochemical properties and microbial biomass in a *Pinus sylvestris* var.

- mongolica plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(5): 1445-1454(in Chinese).
- [24] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准: 主要树种龄级与龄组划分 LY/T 2908—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Forestry Standard of the People's Republic of China: Regulations for age-class and age-group division of main tree-species. LY/T 2908—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 4(in Chinese).
- [25] 胡婵娟, 刘国华, 吴雅琼. 土壤微生物生物量及多样性测定方法评述[J]. 生态环境学报, 2011, 20(Z1): 1161-1167.
HU C J, LIU G H, WU Y Q. A review of soil microbial biomass and diversity measurements[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(Z1): 1161-1167(in Chinese).
- [26] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [27] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 50-51.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 50-51(in Chinese).
- [29] YIM M H, JOO S J, SHUTOU K, et al. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: Estimation of the number of sampling points required [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175(1-3): 585-588.
- [30] 杨涛, 徐慧, 李慧, 等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 50-53.
YANG T, XU H, LI H, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in *Pinus sylvestris* Plantations [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(3): 50-53(in Chinese).
- [31] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 等. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2225-2228.
WU X Y, JIANG F Q, LI X D, et al. Decline regularity and causes of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2225-2228(in Chinese).
- [32] 卜涛, 张水奎, 宋新章, 等. 几个环境因子对凋落物分解的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 740-747.
BU T, ZHANG S K, SONG X Z, et al. Effects of several environmental factors on litter decomposition [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(5): 740-747(in Chinese).
- [33] 郭绪虎, 肖德荣, 田昆, 等. 滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 [J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1425-1432.
GUO X H, XIAO D R, TIAN K, et al. Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1425-1432(in Chinese).
- [34] 关阅章, 刘安田, 仲启铖, 等. 滨海围垦湿地芦苇凋落物分解对模拟增温的响应 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(5): 27-34.
GUAN Y Z, LIU A T, ZHONG Q C, et al. Responses of decomposition of *Phragmites australis* litter to simulated temperature enhancement in the reclaimed coastal wetland [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2013(5): 27-34(in Chinese).
- [35] 牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2663-2672.
NIU X Y, SUN X M, CHEN D S, et al. Soil microorganisms, nutrients and enzyme activity of *Larix kaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2663-2672(in Chinese).
- [36] 杨曾赞, 曾杰, 徐太平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素 [J]. 生态环境, 2007, 16(2): 649-654.
YANG Z J, ZENG J, XU D P, et al. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: A review [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 649-654(in Chinese).
- [37] 杨传波, 黄敬林, 李宝年, 等. 樟子松树栖真菌群落物种多样性及其与病害的关系 [J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(5): 94-96.
YANG C B, HUANG J L, LI B N, et al. The relationship between the species diversity of dendrocola mycoflora on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and disease [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32(5): 94-96(in Chinese).
- [38] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 等. 东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征 [J]. 草业学报, 2007, 16(4): 62-68.
YANG C D, LONG R J, CHEN X R, et al. Study on microbial biomass and its correlation with the soil physical properties under the alpine grassland of the east of Qilian Mountains [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(4): 62-68(in Chinese).
- [39] LIAO J D, BOUTTON T W. Soil microbial biomass response to woody plant invasion of grassland [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(5): 1207-1216.
- [40] 陈婷, 郗敏, 孔范龙, 等. 枯落物分解及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
CHEN T, XI M, KONG F L, et al. A review on litter decomposition and influence factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1927-1935(in Chinese).
- [41] 任天志. 持续农业中的土壤生物指标研究 [J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 68-75.
REN T Z. Soil bioindicators in sustainable agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(1): 68-75(in Chinese).
- [42] DEVI N B, YADAVA P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.