

生态环境因子对四川松茸菌塘土壤微生物的影响*

李小林¹ 金鑫^{1,2} 李强^{1,3} 熊川^{1,3} 郑林用^{1,2**}

¹四川省农业科学院土壤肥料研究所 成都 610066

²四川省农业科学院 成都 610066

³四川大学生命科学学院 成都 610065

摘要 以四川藏区和攀西松茸代表产区菌塘土壤为研究对象,测定菌塘土壤细菌、放线菌和真菌的菌落数量,土壤微生物的生物量碳和氮,以及土壤酸性磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶活性,采用多元回归树分析生态环境因子对微生物的影响。结果表明:当海拔高于3 592 m时,在一定范围内海拔越高(3 841-3 860 m),土壤酶活性越高;当海拔低于3 592 m时,枯枝落叶层厚度越厚(2.25-8.45 cm)、海拔越低(3 058-3 226 m),土壤酶活性越高。当坡度大于或等于42.5°时,一定范围内枯枝落叶层厚度越高(1.05-8.45 cm)、海拔越低(3 058-3 225 m),松茸菌塘微生物生物量及菌落数量越高;而当坡度小于42.5°时,在一定范围内海拔越低(3 058-3 460 m)、枯枝落叶厚度越薄(0.28-3.2 cm)越有利于松茸菌塘土壤微生物生物量和菌落数量积累。总之,海拔、坡度及枯枝落叶厚度是影响松茸菌塘土壤微生物活性和生物量的3个关键因素。图3 表2 参21

关键词 松茸;微生物活性;微生物生物量;土壤酶;藏区;攀西地区

CLC Q178.1

Effects of ecological environment factors on soil microorganisms of *Tricholoma matsutake* shiro in Sichuan Province*

LI Xiaolin¹, JIN Xin^{1,2}, LI Qiang^{1,3}, XIONG Chuan^{1,3} & ZHENG Linyong^{1,2**}

¹Soil and Fertilizer Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

²Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

³School of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract This research investigated soil samples of *Tricholoma matsutake* shiroes in Tibetan region and Panxi region of Sichuan Province to understand the effect of microbial activities and biomass on *T. matsutake*, and the potential effects of environmental variables on microorganism of *T. matsutake* shiroes. The microbe quantity of microorganisms (bacteria, actinobacteria, and fungi), the microbial biomass (microbial biomass carbon and nitrogen), and the enzyme activities (acid phosphatase, urease, and catalase) were analyzed. Multivariate regression tree was used to study the microbial activity and microbial biomass associated with environmental variables including elevation, slope, thickness and coverage of litter. The results showed that above the 3 592 m elevation, the enzyme activities of *T. matsutake* shiroes increased with the elevation (3 841 - 3 860 m); below the 3 592 m elevation, however, the enzyme activities increased with the litter thickness (2.25 - 8.45 cm) but decreased with elevation (3 058 - 3 226 m). With slopes greater than 42.5°, the microbial quantity and biomass increased with the litter thickness (1.05 - 8.45 cm) and decreased with elevation (3 058 - 3 225 m); with slopes smaller than 42.5°, however, the microbial quantity and biomass decreased with both litter thickness (0.28 - 3.2 cm) and elevation (3 058 - 3 460 m). In conclusion, elevation, slope, and litter thickness are the major environmental factors affecting the soil microbial activity and biomass in *T. matsutake* shiroes.

Keywords *Tricholoma matsutake*; microbial activity; microbial biomass; soil enzyme; Tibetan region; Panxi region

松口蘑[*Tricholoma matsutake* (Ito. Et Imai) Sing.]俗称松

茸,是一种珍贵的野生食用菌,目前尚无人工栽培的成功先例。松茸具有独特的浓郁香味,在日本被视为食用菌中的极品,素有“菌中之王”等美称。在我国松茸主要分布于长白山和横断山区^[1],广泛分布于东北吉林省和西南的四川、云南、西藏等地。其中,四川的松茸分布主要集中于雅江、稻城、九龙、丹巴、乡城、小金、木里等藏区及盐源、冕宁、盐边等攀西地区^[2]。

松茸对其生长环境要求极为苛刻,而菌塘是松茸生长

收稿日期 Received: 2014-07-09 接受日期 Accepted: 2014-08-04

*四川省科技支撑计划项目(2013NZ0029, 2012NZ0003, 2014FZ0004)和四川省财政创新能力提升工程青年基金项目(2014CXSF-030)资助 Supported by the Science & Technology Pillar Program of Sichuan (2013NZ0029, 2012NZ0003 & 2014FZ0004), and the Youth Foundation for Innovation Capacity Building Project of Sichuan Financial Department (2014CXSF-030)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zly6559@126.com)

的重要载体,是松茸完成生活史的具体场所。菌塘(Shiro),在日文中意思为“白色堡垒”,是指松茸菌丝体与土壤中的寄主吸收根、土壤及腐殖质等相互结合,形成的一种疏松、透气、类似海绵奖的一种团状结构,对松茸的产量和品质起着十分重要的作用^[3]。土壤微生物在菌塘形成、有机质代谢、养分转化以及森林生态系统中的物质循环和能量流动具有不可替代的作用。有研究表明,松茸菌塘内土壤微生物对松茸的菌丝体生长发育以及子实体的形成都起着关键作用^[4-5]。土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,对于保持土壤生态系统稳定具有不可替代的作用。但目前对松茸菌塘土壤微生物的群落结构和多样性研究仍然不足,未能深入了解菌塘微生物与松茸发生之间的机理,从而延缓了松茸的人工栽培。

鉴于此,我们以四川藏区和攀西地区5个县的松茸菌塘为研究对象,探讨了松茸菌塘环境因子对微生物组成和活性的影响,旨在了解松茸菌塘生态系统的特性,为松茸原位保育促繁及人工栽培工作提供指导意见。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四川藏区和攀西地区松茸产地气候类似,属于典型高原型气候,空气稀薄,气温较低,太阳辐射强烈;夏秋季节气候凉爽湿润,昼夜温差大,降雨量占全年80%以上。研究区域的森林植被因海拔不同而表现差异,大致分为针阔叶混交林、针叶林、高山灌丛和草甸,而松茸发生地植被主要为针阔叶混交林和高山灌丛两类。其中,乔木主要为云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast.)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst),灌木主要为高山栎(*Quercus semicarpifolia* Smith)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)等,草本主要为野古草(*Arundinella anomala* Steud.)、细柄草(*Capillipedium parviflorum* (R. Br.) Stapf.)、纤维马唐(*Digitaria fibrosa* (Hack.) Stapf.)等。该区域松茸寄主则主要为高山栎和云南松,而松茸生长季伴生菌主要为美味牛肝菌(*Boletus edulis* Bull.)、血红菇(*Russula sanguine* (Bull.) Fr.)、松乳菇(*Lactarius deliciosus* (L.) Gray)、变绿红菇(*Russula virescens* (Schaeff.) Fr.)和粘盖乳牛肝菌(*Suillus bovinus* (Pers.) Roussel)等。

1.2 土壤样品采集

于2013年8月,分别在具有代表性的小金(XJ)、雅江(YJ)、木里(ML)、盐源(YY)及盐边县(YB)各选择了5个松茸菌塘样点。去掉枯枝落叶等杂物后取0-10 cm深度的土壤(约1 kg),每个样品采集点各3次重复采样。将样品装入无菌袋中,低温保存带回实验室,去除样品中石块、动植物残体及植物根系后,再将样品过2 mm尼龙网筛后,装入无菌塑料袋中,置于4℃冰箱保存备用,共采集25个菌塘。在采集土壤的同时,记录菌塘主要生态环境因子(经度、纬度、海拔、坡度、枯枝落叶层厚度和盖度。其中经纬度和海拔采用高精度GPS(E640+MobileMapper,北京天恒)记录,坡度采用多功能坡度测量仪(苏州科瑞)记录,同时以菌塘为中心设置1 m×1 m的小型校方测量记录枯枝落叶层厚度及盖度。

1.3 土壤样品分析

土壤细菌、放线菌及真菌的计数测定采用稀释平板测定法,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌采用改良高氏一号培养基,真菌采用马丁氏孟加拉红培养基^[6]。土壤微生物生物量碳和氮的测定采用氯仿熏蒸浸提法^[7]。土壤脲酶活性测定采用UE试剂盒法(科铭生物,苏州),一个酶活力单位(U/g)以24 h每g土样中产生1 μg NH₃-N来表示;土壤酸性磷酸酶活性的测定采用S-ACP试剂盒法(科铭生物,苏州),一个酶活力单位(U/g)以24 h每g风干土样在反应体系中释放1 mg酚来进行表示;土壤过氧化氢酶活性的测定采用S-CAT试剂盒法(科铭生物,苏州),一个酶活力单位(U/g)以24 h每g风干土样在反应体系中催化1 mmol H₂O₂降解表示。

1.4 数据处理

试验数据的方差分析采用SPSS(17.0),环境生态因子对松茸菌塘微生物活性及微生物生物量的影响采用多元回归树分析,多元回归树的构建采用R语言mvpart程序包中的mvpart函数^[8]。

2 结果与分析

2.1 环境因子与微生物活性

从整体上看,所有样品间的生态因子及微生物活性存在明显差异(表1和表2),不同县域间松茸菌塘差异较为明显,而同一县域之间的松茸菌塘环境因子则变化不大。样品海拔范围均在3 000 m以上,最高海拔为3 860 m。坡度范围变化较大,从5°一直过渡70°。同时枯枝落叶厚度变化范围也较大,最厚的为8.45 cm(YB2),而最小的仅为0.28 cm(ML1)。通过比较样品的微生物生物量和菌落数量发现,采自相近地点的样品差异也相对较大,而枯枝落叶盖度及土壤酶活性的变化范围相对较小。

2.2 生态因子对松茸菌塘土壤酶活的影响

生态环境因子对松茸菌塘土壤酶活性影响的多元回归树分析见图1,其交叉验证误差和交叉验证标准误分别为1.33和0.354,能较好地反映生态环境因子与土壤酶活性之间的相互关系。在所有选择的生态因子中,海拔和枯枝落叶层厚度被用于多元回归树的构建,二者对土壤酶活性具有明显影响。

通过多元回归树分析发现,第1次分割以海拔3 592 m为节点,将所有25个菌塘分为两组。第1组海拔大于或等于3 592 m,共涉及6个菌塘。第2组海拔小于3 592 m,共包括19个菌塘。在海拔大于或等于3 592 m时,海拔3 841 m成为了该组的第1次分割节点,高于或等于3 841 m时菌塘数量表现更优,表明当海拔大于或等于3 592 m时,在一定程度上海拔越高越有利于松茸菌塘的酶活优势。在小于3 592 m组中,共有3次分割,其中两次为枯枝落叶层厚度,一次为海拔高度。第1次分割以枯枝落叶层厚度为1.6 cm为节点,当枯枝落叶层厚度大于或等于1.6 cm时,松茸菌塘的酶活表现更高。同时在该组中,枯枝落叶层厚度与海拔成为影响这12个菌塘酶活的关键生态因子。从菌塘数量优势可以发现,枯枝落叶层厚度大于或等于2.25 cm时,松茸菌塘土壤酶活更高。在大于或等于2.25 cm组中,再次分割的节点则变为海拔高度3 226 m,低于该节点

表1 不同松茸菌塘环境因子
Table 1 Ecological environment factors of *Tricholoma matsutake* shiroes sampling sites (N = 3)

样品 Sample	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Elevation (h/m)	坡度 Slope (α/°)	枯枝落叶厚度 Litter thickness (δ/cm)	枯枝落叶盖度 Litter coverage (r/%)
XJ1	102°35'08.26"	31°12'44.31"	3214	70	3.60	90
XJ2	102°35'07.26"	31°12'44.33"	3235	70	1.70	89
XJ3	101°11'35.95"	30°04'56.17"	3237	70	3.60	90
XJ4	103°35'05.77"	31°12'44.50"	3265	70	3.90	90
XJ5	102°35'01.53"	31°12'42.09"	3240	70	0.90	90
YJ1	101°11'37.43"	30°04'55.55"	3847	30	2.10	95
YJ2	101°11'36.34"	30°04'55.77"	3843	10	3.70	70
YJ3	101°11'35.95"	30°04'56.17"	3860	5	2.70	80
YJ4	101°11'36.19"	30°04'56.45"	3856	5	1.50	80
YJ5	101°11'38.70"	30°04'56.49"	3838	40	6.20	95
YY1	101°43'20.40"	27°32'12.56"	3151	60	1.95	95
YY2	101°43'12.72"	27°32'18.26"	3132	25	5.30	95
YY3	101°43'09.55"	27°32'19.07"	3064	10	5.20	95
YY4	101°43'09.40"	27°32'18.76"	3058	12	1.50	97
YY5	101°43'09.35"	27°32'18.83"	3069	11	4.00	95
YB1	101°12'29.59"	27°08'16.27"	3173	31	2.40	70
YB2	101°12'32.92"	27°08'17.01"	3191	45	8.45	95
YB3	101°12'32.94"	27°08'17.05"	3192	45	1.20	95
YB4	101°12'35.06"	27°08'17.77"	3204	45	0.50	79
YB5	101°12'36.84"	27°08'17.81"	3207	39	2.10	89
ML1	101°07'38.18"	28°01'42.38"	3337	40	0.28	75
ML2	101°07'28.28"	28°00'36.59"	3584	40	1.20	90
ML3	101°07'26.54"	28°00'37.18"	3583	20	1.12	50
ML4	101°07'28.51"	28°00'36.34"	3598	20	1.23	80
ML5	101°07'29.29"	28°00'36.65"	3585	20	1.85	90

表2 不同松茸菌塘土壤微生物学特性
Table 2 Soil microbial properties of *Tricholoma matsutake* shiroes sampling sites (N = 3)

样品 Sample	磷酸酶 Phosphatase (λ/U g ⁻¹)	脲酶 Urease (λ/U g ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase (λ/U g ⁻¹)	微生物生物量 碳 Microbial biomass carbon (w/mg kg ⁻¹)	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen (w/mg kg ⁻¹)	细菌 Bacteria (n/10 ⁶ cfu g ⁻¹)	放线菌 Actinobacteria (n/10 ⁵ cfu g ⁻¹)	真菌 Fungi (n/10 ⁴ cfu g ⁻¹)
XJ1	565	376	125	231	3.7	15.2	5.7	5.5
XJ2	389	215	116	190	24.1	89.8	1.9	5.4
XJ3	388	461	120	93.0	13.8	10.5	4.5	8.3
XJ4	502	287	132	361	14.4	683	1.4	9.6
XJ5	480	508	113	299	6.4	24.0	9.4	5.3
YJ1	511	348	107	324	3.6	24.4	6.9	9.3
YJ2	484	288	112	173	9.7	13.6	9.9	7.8
YJ3	515	255	107	148	8.0	397.6	17.5	2.6
YJ4	410	183	116	228	17.1	35.6	1.7	6.5
YJ5	431	122	96	153	23.3	109.7	0.7	4.2
YY1	503	257	127	176	19.5	0.8	0.8	14.4
YY2	534	415	111	212	21.6	25.3	0.4	25.9
YY3	513	387	107	276	30.0	9.4	5.6	5.9
YY4	581	388	108	324	14.1	23.9	0.5	8.1
YY5	472	416	130	209	15.1	72.1	1.4	10.2
YB1	489	455	121	479	11.6	5.9	2.3	9.0
YB2	493	413	105	260	6.2	8.3	2.4	6.8
YB3	496	457	106	154	8.5	30.5	1.4	4.6
YB4	524	413	100	283	2.9	13.2	1.9	6.5
YB5	436	310	106	601	21.5	7.2	0.5	3.5
ML1	531	409	102	397	18.4	4.3	1.4	4.4
ML2	468	410	99.6	174	18.5	79.0	0.6	11.9
ML3	462	388	99.2	279	43.6	5.9	1.0	17.2
ML4	510	332	43.5	166	12.0	9.7	1.4	4.8
ML5	494	372	121	203	38.0	9.7	1.5	6.6

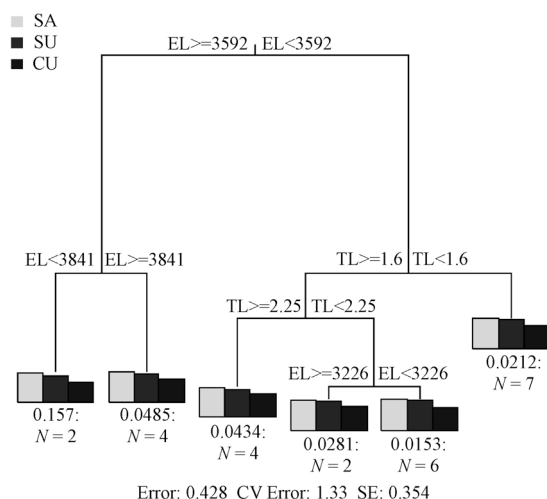


图1 土壤酶活与环境生态因子的多元回归树分析。SA: 土壤酸性磷酸酶; SU: 土壤脲酶; SC: 土壤过氧化氢酶; EL: 海拔(m); TL: 枯枝落叶层厚度(cm); N: 样方个数; Error: 相对误差; CV Error: 交叉验证误差; SE: 交叉验证标准误差。

Fig. 1 Multivariate regression tree of soil enzymatic activities associated with environmental variables. SA: Soil acid phosphatase; SU: Soil urease; SC: Soil catalase; EL: Elevation (m); TL: Litter thickness (cm); N: number of sampling sites; Error: Relative error; CV Error: Cross validation error; SE: Cross validation standard error.

共6个菌塘, 而高于该节点只有2个菌塘。

在构建多元回归树的过程中, 有两个环境因子没有出现在回归树中, 分别为坡度和枯枝落叶层盖度, 似乎这两个因子对松茸菌塘酶活的影响并不是特别大, 而海拔和枯枝落叶层厚度是对松茸菌塘土壤酶活影响最大的两个关键因子。当海拔高于3 592 m时, 在一定程度上海拔越高越有利于土壤酶活性提高。当海拔低于3 592 m时, 枯枝落叶层厚度越厚, 海拔越低越有利于松茸菌塘土壤酶活性提高。

2.3 生态条件对松茸菌塘微生物生物量的影响

生态环境因子与松茸菌塘微生物生物量碳和氮的多元回归树分析见图2, 其交叉验证误差和交叉验证标准误差分别为2.14和0.367, 可以较好地反映环境因子与微生物生物量之间的关系。在本次建树过程中, 坡度、海拔与枯枝落叶层厚度都参与了构建, 而枯枝落叶层盖度则没有参与。

通过构建多元回归树, 发现第1次分割以坡度42.5°为节点, 将所有25个菌塘分为两组, 一组9个菌塘, 一组16个菌塘。第1组坡度大于或等于42.5°, 该组第1次分割以枯枝落叶层厚度为1.05 cm为节点, 当其大于或等于1.05 cm时, 菌塘微生物生物量表现优势明显; 第2次分割以海拔3 225 m为节点, 节点左右差异不明显, 但当海拔小于3 225 m时, 菌塘微生物生物量表现更具明显优势。第2组坡度小于42.5°, 该组分别以海拔3 841 m、3 460 m及3 592 m和枯枝落叶层厚度3.2 cm为节点进行4次分割。在该组第1次分割中, 当海拔低于3 841 m时, 分割的菌塘数量占优势; 在第2次分割中, 当海拔低于3 460 m时, 分割的菌塘数量也占优势; 而同样在第3次分割中, 海拔越低的样品数量越占优势。这表明, 当坡度大于或等于42.5°时, 一定范围内枯枝落叶层厚度越高、海拔越低, 松茸菌塘微生物

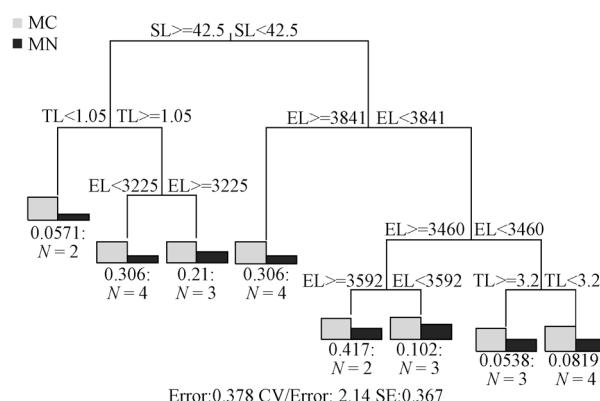


图2 微生物生物量与环境生态因子的多元回归树分析。MC: 微生物生物量碳; MN: 微生物生物量氮; SL: 坡度(°); EL: 海拔(m); TL: 枯枝落叶厚度(cm)。

Fig. 2 Multivariate regression tree of microbial biomass associated with environmental variables. MC: Microbial biomass carbon; MN: Microbial biomass nitrogen; SL: Slope (°); EL: Elevation (m); TL: Litter thickness (cm).

生物量越高; 当坡度小于42.5°时, 一定程度上海拔越低, 松茸菌塘土壤微生物生物量越高。当海拔低于3 460 m时, 枯枝落叶层厚度越低(<3.2 cm), 松茸菌塘微生物生物量越高。

2.4 环境对松茸菌塘菌落数量的影响

生态环境因子对松茸菌塘土壤菌落数量影响的多元回归树分析见图3, 其交叉验证误差和交叉验证标准误差分别为1.58和0.213, 在一定程度上能较好地反映环境因子与菌塘土壤可培养菌落数量之间的相互关系。同微生物生物量一样, 在所有选择的生态因子中, 坡度、海拔和枯枝落叶层厚度均参与了多元回归树的构建, 表现了三者对菌落数量具有较强的影响。

通过多元回归树构建, 发现第1次分割以坡度42.5°为节点, 将所有25个菌塘分为两组, 大于或等于42.5°为9个菌塘, 小于42.5°为16个菌塘。在坡度大于或等于42.5°时, 枯枝落叶层厚度和海拔为影响该组菌塘分布的两个主要关键因子。组内第1次分割以枯枝落叶层厚度1.05 cm为重要节点, 小于该值有两个菌塘, 大于或等于该值有7个菌塘。组内第2次分割以海拔3 225 m为关键节点, 小于该值有4个菌塘, 大于该值有3个菌塘。该组表现出在一定范围内(坡度 $\geq 42.5^\circ$), 枯枝落叶层厚度越厚(>1.05 cm), 海拔越小(<3 225 m), 菌塘菌落数量越高。当坡度小于42.5°时, 共有4次分割, 分别以海拔3 592 m、3 841 m、3 460 m和枯枝落叶层厚度3.2 cm为节点。组内第1次分割时, 海拔小于3 592 m的菌塘表现出数量优势明显。在大于或等于3 592 m组, 海拔越高($\geq 3 841$ m)菌塘菌落数量越高。在小于3 592 m组, 海拔越低(<3 460 m)枯枝落叶层厚度越薄(<3.2 m), 菌塘菌落数量越高。

在该多元回归树的构建过程中, 所有枯枝落叶层盖度没有参与在回归树的构建, 表明该影响因子对松茸菌塘菌落数量的影响并不大。参与构建的坡度、海拔和枯枝落叶层厚度成为对松茸菌塘土壤菌落数量影响最大的3个关键因子。当坡度大于或等于42.5°时, 在一定程度上枯枝落叶层厚度越厚、海拔越低, 越有利于松茸菌塘土壤菌落数量的积累。当坡

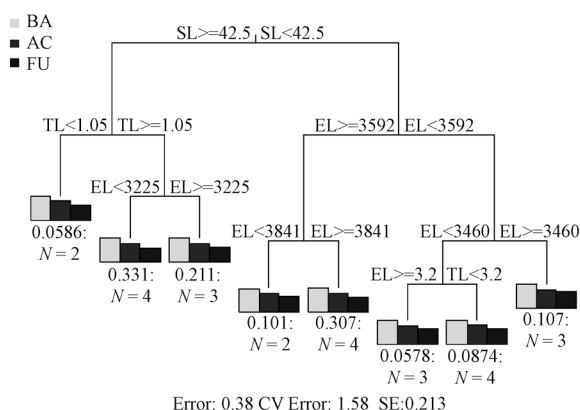


图3 菌落数量与环境生态因子的多元回归树分析。BA: 细菌数量; AC: 放线菌数量; FU: 真菌数量; SL: 坡度($^{\circ}$); EL: 海拔(m); TL: 枯枝落叶厚度(cm)。

Fig. 3 Multivariate regression tree of microbe quantity associated with environmental variables. BA: Quantity of bacteria; AC: Quantity of actinobacteria; FU: Quantity of fungi; SL: Slope ($^{\circ}$); EL: Elevation (m); TL: Litter thickness (cm).

度小于42.5 $^{\circ}$ 时,在一定范围内海拔越低、枯枝落叶层厚度越薄,越有利于松茸菌塘土壤菌落数量积累。

3 讨论

不同海拔地点的土壤往往由于温度、降雨、植被、光照等环境因素差异明显而表现出不同的微生物活性和生物量。前人研究表明,高海拔地区土壤冻融对微生物群落结构及土壤酶活性影响较大^[9]。本研究发现,在四川藏区和攀区,当海拔高于3 592 m时,在一定程度上海拔越高越有利于保持土壤酶活性。这是由于在冬季雪被的保温作用为土壤微生物提供了较为稳定的微环境^[10],较好地保护了微生物的生长,因而在其解冻以后土壤酶活性得到提高^[11]。本研究还发现,当海拔低于3 592 m时,枯枝落叶层厚度越厚、海拔越低越有利于保持松茸菌塘土壤酶活性。这是由于海拔低于一定高度以后,不稳定的雪被无法为土壤微生物提供一个稳定的保温微环境,枯枝落叶层则发挥了雪被的保温作用,同时枯枝落叶层释放的可溶性养分等促进了土壤微生物的生长,进而使得土壤酶活性得到提升^[12]。

海拔和枯枝落叶层能在一定程度上调节松茸菌塘的紫外线强度、温湿度^[13]、碳源^[14]、有机质和土壤的透气性及透水性^[15]。本研究发现,坡度42.5 $^{\circ}$ 为一个关键的临界点。当坡度大于或等于42.5 $^{\circ}$ 时,一定范围内枯枝落叶层厚度越大(≥ 1.05 cm)、海拔越低($< 3 225$ m),松茸菌塘微生物生物量及菌落数量越高;而当坡度小于42.5 $^{\circ}$ 时,在一定范围内海拔越低($< 3 460$ m)、枯枝落叶层厚度越薄(< 3.2 cm)越有利于松茸菌塘土壤微生物生物量和菌落数量积累。四川松茸产区属北半球温带地区,阳坡坡度越小,光照强度越小,而阴坡坡度越小,光照强度越大。对于高原地区来讲,光强度越大就意味着紫外线越强,过强的紫外线能有效地抑制微生物的生长。本研究中,松茸菌塘均为阳度。因此坡度越大,紫外线辐

射越强,唯有低海拔和较厚的枯枝落叶层能有效地保护菌塘内微生物的生长与活性;而坡度过小,则阳光光照不足,较薄的枯枝落叶层有利于阳光对松茸菌塘的照射,同时略低的海拔也有利于防止紫外线过于强烈而影响微生物的生长和积累。

松茸菌塘是一个复杂且特殊的生态系统,其中微生物不仅受到温度、降雨、植被、光照等环境因素影响,还受到森林生态系统中动物、植物、真菌对其影响。本研究以四川藏区和攀西地区松茸主产代表区域菌塘为对象,研究了海拔、坡度、枯枝落叶层厚度、枯枝落叶盖度对松茸菌塘菌落数量、微生物生物量及土壤酶活性的影响,可为该区域松茸的人工原位保育和促繁工作提供具体的技术参数。当然,松茸子实体的形成与发生不仅与菌塘微生物有较大关系,同时还与发生地的植被^[16]、气温^[17]、降水^[18]、土壤温湿度^[19]、采集方式^[20]和管理模式^[21]等因素存在密切联系,因此,以后有必要加强温度、降雨量、优势植物、土壤理化性质等环境因子对松茸产量及品质影响的研究。

参考文献 [References]

- 袁天凤,段彬,邱道持,何江. 松茸的地理分布与生态研究[J]. 中国食用菌, 2006, 25 (4): 14-17 [Yuan TF, Duan B, Qiu DT, He J. A study on geographic distributing and ecology of *Tricholoma matsutake* [J]. *Edible Fungi China*, 2006, 25 (4): 14-17]
- 廖树云,刘彬. 四川松茸的特殊生态研究[J]. 四川农业大学学报, 1991, 9 (2): 297-302 [Liao SY, Liu B. The special ecological environment of Matsutake mushroom in Sichuan [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 1991, 9 (2): 297-302]
- Ogawa M. Microbial ecology of "shiro" in *Tricholoma matsutake* (Ito et Imai) Sing. and its allied species. V *Tricholoma matsutake* in *Tsuga sieboldii* forests [J]. *Trans Mycol Soc Jpn*, 1977, 18: 34-36
- 杨民和,杨新美,陈立国. 松茸与宿主根际微生物相互关系的研究[J]. 江西农业大学学报, 1997, 14 (4): 78-82 [Yang MH, Yang XM, Chen LG. Studies on the relationship between *Tricholoma matsutake* and other rhizosphere microorganisms [J]. *J Jiangxi Agric Univ*, 1997, 14 (4): 78-82]
- 刘培贵,袁明生,王向华. 松茸群生物资源及其合理利用与有效保护[J]. 自然资源学报, 1999, 14 (3): 245 [Liu PG, Yuan MS, Wang XH. Notes on the resources of Matsutake group and their reasonable utilization as well as effective conservation in China [J]. *J Nat Resour*, 1999, 14 (3): 245]
- 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 [Yao HY, Huang CY. *Soil microbial ecology and experimental technique* [M]. Beijing: Science Press, 2006]
- 郭依秋,范秀华,汪金松,金冠一. 太岳山油松林土壤微生物量对模拟氮沉降的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19 (4): 605-610 [Guo YQ, Fan XH, Wang JS, Jin GY. Responses of soil microbial biomass to simulated nitrogen deposition in *Pinus tabulaeformis* forests in the Taiyue mountain of China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, 19 (4): 605-610]
- 李小林,江华明,张波,唐国庆,Petri P,曾珍,郑林用,张小平. 应用LH-PCR研究党参、麻黄和独一味内生细菌多样性[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (9): 2511-2517 [Li XL, Jiang HM, Zhang B, Tang GQ, Penttinen P, Zhen Z, Zheng LY, Zhang XP. Endophytic bacterial diversity in

- Codonopsis pilosula*, *Ephedra sinica*, and *Lamiophlomis rotata*: a study with LH-PCR [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24** (9): 2511-2517]
- 9 Freppaz M, Williams B, Edwards A, Scalenghe R, Zanini E. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability [J]. *Appl Soil Ecol*, 2007, **35** (1): 247-255
- 10 Jones H. Snow Ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-302
- 11 Brooks PD, Williams MW, Schmidt SK. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **43** (1): 1-15
- 12 Larsen K, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types [J]. *Appl Soil Ecol*, 2002, **21** (3): 187-195
- 13 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, **25** (10): 2662-2668 [Hu YL, Wang SL, Huang Y, Yu XJ. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (10): 2662-2668]
- 14 Ribeiro C, Madeira M, Araujo M. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globules* under different water and nutrient regimes[J]. *For Ecol Manage*, 2002, **171** (122): 31-41
- 15 季晓燕, 江洪, 洪江华, 马元丹. 亚热带3种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33** (6): 1731-1739 [Ji XY, Jiang H, Hong JH, Ma YD. Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (6): 1731-1739]
- 16 苏云霞, 李荣春, 朱海庆, 孟珍贵, 张灵, 陈严平. 丽江松茸产区植物群落特征[J]. 食用菌学报, 2009, **16** (4): 68-73 [Su YX, Li RC, Zhu HQ, Meng ZG, Zhang L, Chen YP. Plant community composition in the Lashi *Tricholoma matsutake*-producing area of Lijiang city [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2009, **16** (4): 68-73]
- 17 李维国. 适于松茸发生的温度、水分条件[J]. 微生物学杂志, 2005, **25** (3): 70-72 [Li WG. The suitable temperature, moisture conditions of *Tricholoma matsutake* occurring [J]. *J Microbiol*, 2005, **25** (3): 70-72]
- 18 苏开美. 云南楚雄、中甸地区松茸生态环境调查研究[J]. 中国食用菌, 2002, **21** (3): 19-20 [Su KM. Investigation of ecological environment for *Tricholoma matsutake* in Chuxiong and Zhongdian districts in Yunnan [J]. *Edible Fungi China*, 2002, **21** (3): 19-20]
- 19 许广波, 傅伟杰, 魏铁铮, 梁运江, 杨淑荣, 全明道, 李桂花. 长白山区松茸产地的土壤生态[J]. 吉林农业大学学报, 1996 (3): 57-61 [Xu GB, Fu WJ, Wei TZ, Liang YJ, Yang SR, Quan MD, Li GH. Soil ecological characteristics of *Tricholoma matsutake*'s producing area in Changbai mountains region [J]. *J Jilin Agric Univ*, 1996 (3): 57-61]
- 20 Amend A, Fang Z, Yi C, McClatchey WC. Local perceptions of matsutake mushroom management, in NW Yunnan China [J]. *Biol Conserv*, 2010, **143** (1): 165-172
- 21 Yang X, Wilkes A, Yang Y, Xu J, S. Geslani C, Yang X, Gao F, Yang J, Robinson B. Common and privatized: conditions for wise management of matsutake mushrooms in Northwest Yunnan province, China [J]. *Ecol Soc*, 2009, **14** (2): 30