

松茸的适宜生态因子*

李强^{1,4} 陈诚² 李小林³ 金鑫¹ 熊川^{1,4} 郑林用¹ 黄文丽^{1**}

¹四川省农业科学院生物技术核技术研究所 成都 610066

²四川省农业科学院植物保护研究所 成都 610066

³四川省农业科学院土壤肥料研究所 成都 610066

⁴四川大学生命科学学院 成都 610065

摘要 以全国22个松茸 (*Tricholoma matsutake*) 主产区的气候、植被、地形、土壤因子为研究对象,通过主成分分析法,对松茸生长环境进行适宜性评价,寻找影响松茸生长与分布的关键生态因子。结果发现:所分析的20个生态因子中,海拔和砂粒含量的权重最高,分别是0.079和0.077,而交换性锰、郁闭度的权重最低,分别为0.000和0.011;综合评价表明在调查的22个主产区中,四川九龙和康定的主成分得分最高,分别为1.24和1.00,更适合松茸生长,而吉林珲春和吉林龙井主成分得分最低,为-1.21和-0.95;系统聚类发现,中国松茸可划分为4个生态区:东北生态区,川西及西藏生态区,川南及云南生态区,西藏波密生态区。本研究表明海拔和砂粒含量是对松茸生长影响最大的生态因子,四川九龙和康定更适合松茸生长,结果可为松茸的科学保护及保育促繁打下基础。(图1 表5 参26)

关键词 松茸;生态因子;海拔;砂粒含量;生态区;保育促繁

CLC Q949.329.08

The optimal ecological factors for *Tricholoma matsutake**

LI Qiang^{1,4}, CHEN Cheng², LI Xiaolin³, JIN Xing¹, XIONG Chuan^{1,4}, ZHENG Linyong¹ & HUANG Wenli^{1**}

¹Institute of Biological & Nuclear Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

²Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

³Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

⁴College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract This study aimed to find out the key ecological factors affecting the growth and distribution of *Tricholoma matsutake* in China. The climate, topographical, vegetation and pedological factors of 22 *T. matsutake* producing areas were analyzed through the principal component analysis (PCA). The results showed that the altitude and sand content got the highest weight value, which were 0.079 and 0.077 respectively. The crown density and exchangeable Mn in the fairy ring of *T. matsutake* had the lowest weight value (0.000 and 0.011 respectively). Comprehensive evaluation showed that in the 22 investigated regions, Kangding and Jiulong had the highest PCA scores of 1.24 and 1.00. Conversely, the lowest scores appeared in Hunchun and Longjing, which were -1.21 and -0.95. Consequently, the altitude and sand content were the most critical factors affecting the growth of *T. matsutake*. The crown density and exchangeable Mn in the fairy ring of *T. matsutake* had smaller effects on its growth. Kangding and Jiulong were the most suitable for *T. matsutake* growth. While Hunchun and Longjing the least. System clustering found that *T. matsutake* producing areas in China could be divided into four clusters: the northeast biome, western Sichuan and Tibet biome, southern Sichuan and Yunnan biome, and Tibetan Bome biome. The result of this study helps in the scientific protection, integrated nursing and breeding of *T. matsutake*.

Keywords *Tricholoma matsutake*; ecological factor; altitude; sand content; biome; nursing and breeding

松口蘑 [*Tricholoma matsutake* (S. Ito et Imai) Sing.] 隶属担子菌亚门口蘑科口蘑属, 别名松茸、松蕈、合菌、台菌, 是松栎等树木外生的菌根真菌, 具有独特的浓郁香味, 是世界上

珍稀名贵的天然药用菌, 我国二级濒危保护物种^[1]。我国传统医药学认为, 松茸子实体性味甘、平、无毒, 入肾、脾、膀胱三经, 有分利湿浊、固涩小便、补肾、益精、助阳等功用。现代研究表明, 松茸含有17种氨基酸、维生素D、松茸醇、异松茸醇、麦角甾醇、松茸糖等多糖等, 具有显著的抗癌、止痛、抑制恶性噬食细胞分裂、调节性功能等功效^[2]。

松茸主要分布于中国、朝鲜半岛、日本、北欧等地。我国松茸主要分布于西南的横断山区及东北的长白山区。由于对环境要求苛刻, 松茸至今尚不能实现人工栽培^[3]。近年来, 由于掠夺式开采, 又对产区缺乏生态研究和相应的人工促繁

收稿日期 Received: 2016-01-05 接受日期 Accepted: 2016-03-13

*四川省科技支撑计划项目 (2014FZ0004, 2013NZ0029)、四川省青年基金项目 (2014JQ0054) 和四川创新能力建设项目 (2014CXSF-030) 资助 Supported by the National Science & Technology Pillar Program of Sichuan Province (2014FZ0004, 2013NZ0029), the Foundation for Young Scholars of Sichuan Province (2014JQ0054) and the Youth Foundation Program of the Financial & Innovation Capacity Building Project of Sichuan Province (2014CXSF-030)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wenli_h_1111@aliyun.com)

管理,资源遭到极大的破坏,产量与质量均大幅下降^[4-5]。针对这一突出问题,学者们做了大量工作。苏开美调查了云南楚雄、中甸地区松茸的分布、生长条件与共生树种信息^[6];高明文等也调查了川西高原松茸的生态特点^[7];许广波等调查了吉林龙井与安图的松茸产地土壤生态^[8]。这些调查研究对松茸的保育促繁及科学管理提供了很大帮助,但由于这些调查大都在2002年以前进行,而且环境因子调查不全面,产地覆盖面较窄,造成全国松茸生态因子分析缺乏统一标准与数据支撑,影响了松茸的可持续性开发与利用。本研究以全国22个松茸主产区的气候、植被、地形、土壤因子为研究对象,通过主成分分析法,对松茸生长环境进行适宜性评价,以找出影响松茸生长与分布的关键生态因子,为松茸的人工驯化栽培与科学开发打下基础。

1 研究区域与研究方法

1.1 样地的设置与样品采集

在查阅相关资料的基础上,于2014年7-10月松茸产季,选取全国22个主产区(云南德钦、楚雄、牟定、姚安、禄丰,四川德昌、冕宁、九龙、康定、雅江、道孚、小金、马尔康、理县,西藏林芝、米林、工布江达、波密,吉林汪清、珲春、龙井、安图)开展松茸生态因子调查研究。每产地随机选择3-5个菌塘,每个菌塘设置3个样方(30 cm × 30 cm),按“三角形法”进行布设,每个地点采集的菌塘土壤混合用于理化性质的测定。然后记录采样点的地理位置(经纬度、海拔)和地形条件(坡位、坡度、坡向),并以菌塘为中心,划设100 m × 100 m的样方,调查菌塘周围的植被(植被类型、郁闭度、枯枝落叶厚度、枯枝落叶盖度)信息。

1.2 测定项目及方法

土壤理化因子的测定方法:土壤颗粒组成采用沉降法(国际制)^[9],pH采用pH计测定(土水比1:2.5)^[10],有机质采用重铬酸钾容量法^[11],碱解氮采用扩散法^[12],有效磷采用钼锑抗比色法^[11],速效钾采用火焰光度法^[11],交换性铁、镁、铜、锌、钙、镁采用原子吸收分光光度法^[13]。

1.3 数据处理及分析

1.3.1 评价指标的选择及处理 (1)评价指标的选择及量化:地形因子包括海拔(X_1)、坡位(X_2)、坡度(X_3)和坡向(X_4)。其中坡向按照等级制进行量化,每90°为1个区间,以数字表示各等级,1表示东坡(315.5°-45.5°),2表示南坡(45.5°-135.5°),3表示西坡(135.5°-225.5°),4表示北坡(225.5°-315.5°);坡位从下到上分为5个等级,分别赋值1-5,代表下坡、中下坡、中坡、中上坡和上坡^[14-15]。

植被因子包括郁闭度(X_5)、枯枝落叶厚度(X_6)、枯枝落叶盖度(X_7)。

土壤因子包括pH(X_8)、砂粒(X_9)、粉粒(X_{10})、有机质(X_{11})、碱解氮(X_{12})、有效磷(X_{13})、速效钾(X_{14})、交换性铁(X_{15})、交换性锰(X_{16})、交换性铜(X_{17})、交换性锌(X_{18})、交换性钙(X_{19})、交换性镁(X_{20})。

(2)评价指标的标准化:由于评价指标的单位和数量级不同,采用Z-score对数据进行标准化^[16-17],其公式为:

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{SD} \quad (1)$$

式中, x'_i 为标准化后的值, x_i 为原始数据, $\bar{x}$ 为原始数据均值,SD为原始数据标准差。

1.3.2 评价方法 (1)主成分提取和评价指标权重:由于评价指标间存在一定的信息重叠,为找出影响松茸生长的主要地形因子、植被因子和土壤因子,采用主成分分析法,提取特征值大于1、累计贡献率大于80.0%的成分作为主成分^[18-19]。为使因子载荷矩阵中每一行的因子载荷平方的方差达到最大,采用四次方最大法进行旋转以获得各项评价因子载荷矩阵^[20-21]。

(2)综合评价:根据因子载荷矩阵及每个主成分特征值计算各成分回归系数,并依据特征值的贡献率计算综合成分回归系数(F_Z),其公式为:

$$F_Z = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\lambda_j}{k} \right) F_j$$

$$k = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m \quad (2)$$

式中, F_Z 为综合成分回归系数, F_j 为主成分评价指标回归系数。

根据加乘法原理,在相互交叉的同类因子间采用加法合成^[22-23],对各样地松茸的生长进行适宜性评价,得出各成分和综合成分的得分(表5),其计算公式为:

$$S_m = F_j \times x'_i \quad (3)$$

式中, F_j 为主成分评价指标回归系数, x'_i 为各评价指标标准化数据。

统计分析在SPSS (V19.0)和Excel (2007)中进行。

2 结果与分析

2.1 松茸发生地的生态条件

2.1.1 松茸发生地的气候因子 如表1所示,云南松茸产地的年均温为13.6℃,年均降雨量为858.7 mm,德钦县的年均温最低,仅4.7℃左右,而调查的云南其它松茸产地年均温均大于15.6℃,姚安县的年均降雨量最少,为767.5 mm,禄丰的最高,为940.0 mm;四川松茸产地的年均温在10.7℃左右,其中康定最低,仅为7.1℃,年均降雨量为797.2 mm;西藏松茸产地的年均温在8.4℃左右,而且相对比较平均,年均降雨量大约为750.8 mm,各样点差别较大;相较于西南松茸产区,东北松茸产区年均温在4.3℃左右,降雨量为604.2 mm,均比较低。综合来看,几个大的松茸产区无论是年均温还是年均降雨量,都是云南产区最高,四川、西藏次之,吉林产区最低。由于气温与降雨量都呈现明显的季节性变化,这也影响了各产区松茸的发生季节,云南松茸发生季节在6-11月,四川在7月中旬至10月上旬,西藏松茸在7月下旬至9月下旬发生,吉林松茸在8月上旬至9月下旬左右发生,这些季节刚好产区气温处于当地一年中相对较高的时期,降雨量丰富,非常适宜松茸菌丝的生长与子实体的发生。

2.1.2 松茸发生地的地形因子 通过海拔、坡位、坡度和坡向4个指标来评价松茸发生地的地形条件(表2):云南松茸发生地海拔在2 380-3 099 m之间,平均为2 651 m;四川松茸发生地海拔为2 274-3 859 m,平均达到3 214 m,其中德昌、冕宁的海拔相对较低,而四川其它地区松茸产地海拔均大于

表1 各样地基本情况
 Table 1 Basic information of sampling sites

代码 Code	样地 Sampling site	经度 Longitude	纬度 Latitude	年均气温 Average annual temperature (θ/℃)	年均降雨量 Average annual rainfall (h/mm)	主要植被类型 Main vegetation types
P1	云南德钦 Dêqên, Yunnan	99°15'15"	27°47'47"	4.7	850.0	云南松、高山栎 <i>Pinus yunnanensis</i> and <i>Quercus semecarpifolia</i>
P2	云南楚雄 Chuxiong, Yunnan	100°59'11"	25°02'30"	15.6	864.0	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>Castanopsis hystrix</i>
P3	云南牟定 Mouding, Yunnan	101°24'44"	25°18'51"	15.8	872.0	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>C. hystrix</i>
P4	云南姚安 Yaoan, Yunnan	101°06'30"	25°37'37"	15.6	767.5	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>C. hystrix</i>
P5	云南禄丰 Lufeng, Yunnan	101°53'47"	25°16'02"	16.2	940.0	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>C. hystrix</i>
P6	四川德昌 Dechang, Sichuan	102°07'21"	27°23'48"	17.7	1049.0	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>C. hystrix</i>
P7	四川冕宁 Mianning, Sichuan	102°07'00"	28°21'15"	13.8	1075.0	云南松、锥栗 <i>P. yunnanensis</i> and <i>C. hystrix</i>
P8	四川九龙 Jiulong, Sichuan	101°30'28"	29°05'57"	8.7	700.0	油松、高山栎 <i>P. tabulaeformis</i> and <i>Q. semecarpifolia</i>
P9	四川康定 Kangding, Sichuan	101°21'27"	29°40'25"	7.1	875.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P10	四川雅江 Yajiang, Sichuan	101°11'36"	30°04'59"	11	650.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P11	四川道孚 Daoфу, Sichuan	101°39'15"	30°28'53"	8.2	633.6	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P12	四川小金 Xiaojin, Sichuan	102°21'31"	30°58'48"	12.2	613.9	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P13	四川马尔康 Maerkang, Sichuan	101°48'36"	32°07'53"	8.5	753.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P14	四川理县 Lixian, Sichuan	102°45'41"	31°41'28"	9.0	825.0	高山栎、铁杉 <i>Q. semecarpifolia</i> and <i>Tsuga chinensis</i>
P15	西藏林芝 Nyingchi, Tibet	94°24'40"	29°31'05"	8.5	654.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P16	西藏米林 Mainling, Tibet	94°12'33"	29°11'05"	8.2	641.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P17	西藏工布江达 Gongbo, Tibet	93°39'06"	29°53'26"	8.3	808.3	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P18	西藏波密 Bomê, Tibet	95°45'22"	29°53'07"	8.5	900.0	高山栎 <i>Q. semecarpifolia</i>
P19	吉林汪清 Wangqing, Jilin	130°06'52"	43°25'56"	3.9	580.0	赤松 <i>P. densiflora</i>
P20	吉林珲春 Hunchun, Jilin	130°02'33"	43°10'59"	5.65	617.9	赤松、蒙古栎 <i>P. densiflora</i> and <i>Q. mongolica</i>
P21	吉林龙井 Longjin, Jilin	129°41'08"	42°49'11"	5.6	549.3	赤松、蒙古栎 <i>P. densiflora</i> and <i>Q. mongolica</i>
P22	吉林安图 Antu, Jilin	128°45'05"	43°00'00"	2.2	669.7	赤松、蒙古栎 <i>P. densiflora</i> and <i>Q. mongolica</i>

3 000 m; 西藏松茸发生地海拔较高, 平均高达3 485 m; 吉林松茸产地海拔较低, 平均仅507 m. 从调查的结果来看, 松茸一般发生在中坡、中上坡以及上坡, 仅吉林珲春与安图的部分松茸发生在下坡及中下坡, 这可能是受海拔、气候等条件的限制, 从对坡面的调查结果来看, 松茸较多地分布在东、北向的坡面上, 西、南向坡面分布较少, 这可能是受光照的影响, 松茸生长需要较强的散射光.

2.1.3 松茸发生地的植被因子 林冠郁闭度、枯枝落叶厚度、枯枝落叶盖度以及主要植被类型可反应松茸发生地的植被条件(表1, 表2): 松茸发生地优势植被地域间差别很大. 在东北主要以赤松林为主, 间以少量蒙古栎、桦树、山杨等; 云南及四川南部, 主要是云南松林, 并有少量的锥栗、高山栎; 西藏及四川西部产区, 主要植被为高山栎, 并有少量的杜鹃科植物分布. 松茸发生林地的郁闭度基本在50%-80%之间, 每个地区有一定的差异, 保证了松茸发生地具有一定强度的散射光照. 松茸林地枯枝落叶厚度在3-6 cm之间, 而且盖度大都在85%以上, 保证了松茸发生有足够的有机质养分与矿质元素供应, 并且落叶层还起着透气、保水与防止虫鸟食用松茸子实体的作用, 为松茸菌丝生长与子实体发生提供舒适场所.

2.1.4 松茸发生地的土壤因子 松茸菌塘土壤pH范围在4.4-7.0之间, 平均为5.8, 属于弱酸性土壤(表2); 砂粒(0.02-2 mm)及粉粒(0.002-0.02 mm)的总含量在78.2%-98.7%之间, 平均为89.1%, 表明松茸菌塘土壤颗粒较大, 土质较为疏松, 透气性较好, 有利于松茸菌丝生长, 而且透水性相对较好, 保证了松茸菌丝生长既有充足的水分供应, 又不至于因为水分过多, 而影响菌丝的呼吸及生长. 松茸菌塘土壤的有机质含量在43.7-127.0 g/kg之间, 平均为90.8 g/kg, 可为松茸菌丝

的生长提供足够的有机质供应. 松茸菌塘碱解氮的平均含量为82.6 mg/kg, 有效磷的含量为0.2-15.4 mg/kg, 平均为3.6 mg/kg, 而且各产区差异较大, 速效钾的含量为45.2-340.5 mg/kg, 平均含量为176.9 mg/kg. 交换性铁是检测到的松茸菌塘中含量最高的矿质元素, 平均含量为696.8 mg/kg, 各地区含量相差很大, 最高相差16.7倍. 菌塘中交换性锰的含量在1.3-41.7 mg/kg之间, 平均为20.8 mg/kg. 交换性铜与交换性锌的含量相对较低, 平均分别为2.0 mg/kg和0.9 mg/kg. 菌塘中交换性钙与交换性镁的含量平均分别为1.4 cmol/kg 和0.5 cmol/kg.

2.2 主成分和评价指标权重

由表3可知, 从地形因子、植被因子、土壤理化因子中20个指标中共提取出8个主成分, 其累计贡献率达82.7%, 能代表原有评价指标的主要信息. 由表4可知, 第一主成分主要代表了海拔、pH、交换性铜; 第二主成分主要代表了碱解氮、速效; 第三主成分主要代表了土壤的机械组成, 包括了砂粒、粉粒的含量; 第四主成分反应了坡位、枯枝落叶盖度等指标信息; 第五主成分代表了交换性锌等指标信息; 第六主成分反应了枯枝落叶厚度等信息; 第七主成分主要代表了坡度和有效磷; 第八主成分主要反应了有机质、交换性铁等信息. 公因子方差归一化后, 评价指标权重反映对松茸分布影响最大的生态因子, 在评价指标中, 海拔是影响松茸生长最大的地形因子, 枯枝落叶盖度是影响松茸生长的主要植被因子, 砂粒含量、交换性铁、交换性铜、交换性锌是影响松茸生长的主要土壤理化因子. 在评价的所有生态因子中, 海拔、砂粒含量、交换性铜、交换性锌、交换性铁、碱解氮、坡度是对松茸生长影响最大的生态因子, 而交换性锰、郁闭度、粉粒、枯枝落叶厚度对松茸的生长影响较小.

表2 各样地地形因子、植被因子和土壤因子
Table 2 Topographical, vegetation and pedological factors of sampling sites

样地 Sampling site	地形因子 Topographical factor			植被因子 Vegetation factor			土壤因子 Pedological factor													
	海拔 Altitude (X_1/m)	坡位 Slope position (X_2)	坡度 Slope angle (X_3)	坡向 Aspect ($X_4/^\circ$)	郁闭度 Canopy density ($X_5/\%$)	枯枝落叶 厚度 Litter thickness (X_6/cm)	枯枝落叶 盖度 Litter coverage ($X_7/\%$)	pH (X_8)	砂粒 Sand ($X_9/\%$)	粉粒 Silt ($X_{10}/\%$)	有机质 Organic matter ($X_{11}/g\ kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($X_{12}/mg\ kg^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus ($X_{13}/mg\ kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($X_{14}/mg\ kg^{-1}$)	交换性铁 Exchange-able iron ($X_{15}/mg\ kg^{-1}$)	交换性锰 Exchange-able manganese ($X_{16}/mg\ kg^{-1}$)	交换性铜 Exchange-able copper ($X_{17}/mg\ kg^{-1}$)	交换性锌 Exchange-able zinc ($X_{18}/mg\ kg^{-1}$)	交换性钙 Exchange-able calcium ($X_{19}/cmol\ kg^{-1}$)	交换性镁 Exchange-able magnesium ($X_{20}/cmol\ kg^{-1}$)
P1	3099	4	70	4	40	4.2	95	6.01	85.0	9.2	52.0	23.1	0.5	71.9	154.7	18.6	1.9	1.5	1.6	0.8
P2	2536	4	30	4	86	6	100	4.56	68.2	22.1	90.5	30.8	0.5	170.4	213.6	17.2	1.5	0.6	0.5	0.5
P3	2526	4	45	4	70	6	100	5.15	80.0	6.6	120.0	46.2	1.2	90.5	1234.4	2.9	1.7	1.7	0.4	0.1
P4	2715	4	43	4	78	5	100	5.17	51.6	26.6	74.0	83.2	2.1	285.1	1148.5	3.4	2.1	1.4	2.0	0.4
P5	2380	4	41	4	60	4	100	4.68	80.6	4.6	60.1	45.4	1.2	93.6	715.9	21.5	1.1	0.6	2.4	0.3
P6	2490	4	39	1	95	4	100	6.01	59.6	18.5	82.5	55.4	0.2	45.2	296.9	33.5	2.2	1.0	0.5	0.2
P7	2274	5	35	1	50	5.4	94	4.96	89.4	8.4	125.2	26.2	1.1	198.6	483.4	27.8	0.5	0.7	3.4	1.7
P8	3240	5	56	2	40	4.9	100	6.55	78.8	20.4	121.1	180.1	1.3	328.4	141.7	12.7	2.5	1.4	2.2	0.4
P9	3649	5	22	3	60	3	100	6.44	73.4	13.2	96.3	181.6	5.2	340.5	227.1	31.4	2.3	1.0	0.2	0.8
P10	3859	5	28	3	80	5	90	6.12	68.2	19.8	93.8	30.2	2.4	98.6	1153.1	14.1	1.6	0.1	2.0	0.6
P11	3740	3	34	1	60	3	85	5.92	83.0	9.6	82.8	184.8	7.1	220.5	892.0	31.8	1.1	0.5	2.5	0.7
P12	3294	3	41	1	95	5	85	6.96	65.6	22.2	94.4	97.0	1.4	238.5	214.1	11.0	1.5	0.8	0.4	0.4
P13	3366	3	23	4	75	3	85	6.13	71.5	18.5	104.4	156.9	7.2	184.3	1112.0	23.3	1.6	1.1	2.5	0.4
P14	3014	3	45	4	50	3	85	7.01	60.8	22.1	57.7	87.5	2.1	123.5	1266.7	20.9	2.9	1.2	0.0	0.1
P15	3264	3	65	1	65	5	89	6.58	87.8	7.8	43.7	56.8	15.4	163.4	669.3	23.0	4.1	0.5	1.3	0.6
P16	3582	5	45	3	65	7	100	6.06	81.4	13.2	92.4	84.7	13.7	315.5	392.7	15.6	2.1	0.6	0.6	0.1
P17	3498	3	70	1	65	3	85	6.15	69.2	18.0	111.4	80.4	2.1	195.3	284.4	1.3	4.1	0.5	0.5	0.1
P18	3595	5	79	3	93	4.5	85	6.02	85.2	10.2	77.4	56.3	1.5	77.5	2360.4	14.7	4.3	1.4	0.6	0.2
P19	672	5	61	4	47	4	87	5.35	71.2	14.2	126.1	75.5	2.2	116.0	672.2	27.1	0.9	0.4	1.1	0.6
P20	312	1	47	4	54	6	84	4.44	80.1	10.5	127.0	55.5	2.5	111.5	864.6	31.3	1.4	1.5	1.8	0.5
P21	477	3	40	2	67	6	65	5.65	64.6	17.6	66.8	87.9	4.4	263.9	218.8	41.7	1.1	0.8	1.9	0.3
P22	566	2	42	4	63	5.9	85	5.15	80.2	10.5	97.7	90.9	4.7	158.1	613.5	33.6	1.5	1.0	1.8	0.1

P1-P22: 参见表1. P1-P22 please refer to Table 1.

表3 评价因子主成分的特征值和贡献率
Table 3 Eigenvalue and contribution rate of principal components

主成分 Principal component	提取的载荷平方和 Sum of extracted squared loadings		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率(r/%) Contribution of variance	累计方差贡献率(r/%) Cumulative contribution of variance
F1	3.665	18.322	18.322
F2	2.931	14.656	32.978
F3	2.510	12.552	45.530
F4	2.213	11.067	56.597
F5	1.599	7.996	64.593
F6	1.412	7.060	71.653
F7	1.201	6.005	77.658
F8	1.002	5.011	82.669

2.3 松茸生长的适宜性评价

由表5可知,主成分F1排名第一的样地是西藏工布江达县,其次是四川理县,表明这两个样地的海拔、pH、交换性铜更适宜松茸的生长;主成分F2排名第一的是四川康定,其次是四川道孚、四川九龙,表明这几个样地的碱解氮、速效钾的含量更适宜松茸生长;主成分F3排名第一的是西藏林芝、其次是西藏波密,表明这两个样地土壤的机械组成更适宜松茸的生长;主成分F4排名第一的是四川冕宁、其次是九龙,表明这两样地的坡位、枯枝落叶盖度更适宜松茸的生长,而吉林龙井(P21)排名最低;主成分F5排名第一的是四川九龙,其次是吉林珲春、四川康定,表明这几个地区的交换性锌的含量更适宜松茸生长,而四川雅江的排名最低;主成分F6排名第一的是西藏米林,其次是四川九龙,表明这两个样地的枯枝落叶厚度更适宜松茸的生长,而四川理县排名最低;主成分F7排名第一的是四川马尔康,其次是西藏米林,表明这两个样地的坡度和有效磷更适宜松茸的生长,西藏工布江达排名最低;主成分F8排名第一的是西藏波密,其次是四川冕宁,表明这两个样地的有机质、交换性铁更适宜

松茸的生长,云南德钦的排名最低.综合成分F₂得分第一的是样地四川九龙,其次是四川康定、西藏米林、西藏林芝、西藏工布江达,而吉林珲春、吉林龙井排名最低.可见,受地形因子、植被因子和土壤因子综合作用的影响,四川九龙和四川康定样地更适合松茸的生长,而吉林珲春和吉林龙井较差.

2.4 多样地生态因子聚类分析

利用SPSS (19.0)对松茸产地的地形因子、植被因子、土壤理化因子共20个指标进行系统聚类,找出各产地生态因子的相似与分化.由结果(图1)可见,在系数为13的时候,松茸产地共分为两个大的生态区,即东北产区和西南产区,这两个大的生态区在植被类型、海拔、气候、地形以及部分土壤因子上有明显的区别.在系数为5时,分为4个生态区,簇1代表吉林生态区,簇2为川西及西藏生态区,簇3为川南及云南生态区,簇4仅一个样地,为西藏波密,表明西藏波密松茸产地生态具有一定的独特性,主要表现在其土壤理化因子与其它地区差异较大.这些地理分区将有助于我们研究松茸的系统发生,对探索松茸的生态、物种、遗传多样性具有重要价值.

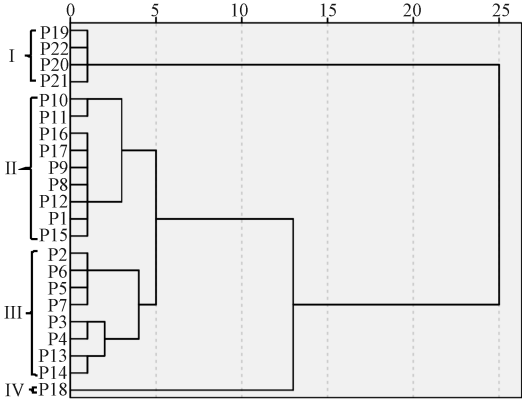


图1 中国松茸产区生态因子系统聚类分析。
Fig. 1 Hierarchical cluster analysis of ecological factors of *Tricholoma matsutake* in different producing areas.

表4 四次方最大法旋转后各项评价因子载荷矩阵和权重
Table 4 Principal components load matrix and weight value after four power solution rotation

评价指标 Evaluation index		因子载荷矩阵 Components load matrix								公因子方差 Communality	权重 Weight value
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8		
地形因子 Topographical factor	X ₁	0.712	0.264	0.328	0.380	-0.073	-0.163	0.226	0.056	0.915	0.079
	X ₂	0.185	0.143	0.206	0.734	-0.147	-0.066	0.027	-0.055	0.665	0.060
	X ₃	0.233	-0.447	0.572	-0.157	0.130	0.130	-0.495	0.032	0.885	0.067
	X ₄	-0.243	-0.536	-0.228	0.152	0.398	0.003	0.405	-0.303	0.836	0.042
植被因子 Vegetation factor	X ₅	0.424	-0.250	-0.357	-0.015	-0.539	0.019	0.271	0.320	0.837	0.011
	X ₆	-0.386	-0.231	-0.089	0.093	-0.270	0.757	0.048	0.103	0.878	0.015
	X ₇	0.089	-0.050	0.104	0.817	0.041	0.139	0.171	-0.312	0.836	0.061
	X ₈	0.762	0.372	0.165	-0.187	0.089	-0.105	-0.115	-0.064	0.818	0.060
土壤因子 Pedological factor	X ₉	-0.403	0.057	0.838	0.026	0.079	0.143	0.085	0.132	0.919	0.077
	X ₁₀	0.499	0.122	-0.736	0.092	-0.015	-0.010	-0.170	0.030	0.843	0.013
	X ₁₁	-0.332	0.095	-0.222	0.346	0.277	0.171	-0.244	0.568	0.777	0.051
	X ₁₂	0.257	0.663	-0.131	-0.149	0.574	-0.021	0.185	0.130	0.926	0.069
	X ₁₃	0.137	0.409	0.387	-0.371	-0.113	0.450	0.448	-0.057	0.892	0.049
	X ₁₄	0.170	0.724	-0.188	0.112	0.242	0.457	0.035	0.059	0.874	0.051
	X ₁₅	0.179	-0.528	0.188	-0.065	0.126	-0.299	0.483	0.452	0.894	0.070
	X ₁₆	-0.522	0.328	-0.061	-0.527	-0.069	-0.192	0.104	-0.219	0.762	0.000
	X ₁₇	0.755	-0.232	0.413	-0.169	0.065	0.135	-0.119	0.046	0.862	0.074
	X ₁₈	0.010	-0.425	-0.047	0.079	0.700	0.078	0.009	-0.021	0.685	0.073
	X ₁₉	-0.614	0.344	0.135	0.051	0.042	-0.251	0.102	0.260	0.659	0.038
	X ₂₀	-0.452	0.447	0.288	0.389	-0.152	-0.291	-0.151	0.019	0.770	0.039

X₁-X₂₀: 参见表2. X₁-X₂₀ please refer to Table 2.

表5 各样地主成分得分及排名

Table 5 Scoring and ranking of principal components of sampling sites

样地 Sampling site	F1		F2		F3		F4		F5		F6		F7		F8		Fz	
	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking
P1	-0.79	16	-1.26	19	2.28	3	0.65	9	0.78	7	-0.91	16	-1.22	20	-2.23	22	-0.19	14
P2	-0.46	13	-0.99	17	-2.15	21	1.62	4	-1.65	21	0.84	6	0.23	12	-0.77	18	-0.50	17
P3	-0.51	15	-2.97	21	0.31	9	1.65	3	0.97	6	1.09	4	0.64	8	0.68	9	-0.10	13
P4	1.28	6	-0.83	15	-2.39	22	1.59	5	0.60	8	0.29	10	0.71	7	0.05	11	0.13	10
P5	-1.92	19	-0.99	16	0.91	7	0.64	10	-0.64	15	-1.10	18	1.05	4	-1.24	20	-0.53	18
P6	1.22	7	-0.69	13	-1.52	18	-0.10	12	-1.63	20	-0.96	17	-0.66	15	-0.77	17	-0.43	16
P7	-3.97	22	1.97	4	1.50	4	2.24	1	-1.21	18	-0.84	15	-1.01	17	1.14	2	-0.20	15
P8	0.87	10	2.07	3	0.31	10	1.76	2	2.64	1	2.60	2	-1.45	21	0.40	10	1.24	1
P9	1.11	8	3.01	1	-0.15	11	1.10	7	1.35	3	-0.24	12	0.82	5	-1.19	19	1.00	2
P10	0.54	11	0.01	10	-0.62	13	1.29	6	-2.22	22	-1.22	19	0.77	6	0.77	7	-0.01	11
P11	-0.48	14	3.00	2	1.07	5	-1.25	17	0.30	10	-1.44	21	1.09	3	0.83	5	0.46	6
P12	2.08	4	0.99	8	-1.73	19	-0.27	13	-1.13	17	0.39	9	-1.08	18	0.79	6	0.23	9
P13	0.35	12	1.16	5	-1.07	17	-0.72	16	1.34	4	-1.25	20	1.96	1	0.96	3	0.25	8
P14	2.49	2	-1.03	18	-0.81	16	-1.42	18	1.27	5	-1.48	22	0.04	13	-1.36	21	-0.03	12
P15	1.34	5	0.78	9	3.66	1	-2.11	21	-1.60	19	1.14	3	0.34	11	-0.60	16	0.64	4
P16	0.88	9	1.12	6	0.97	6	0.80	8	-0.63	14	3.34	1	1.33	2	-0.51	15	0.94	3
P17	2.83	1	-0.09	11	0.48	8	-0.53	15	-0.07	13	0.15	11	-2.48	22	0.91	4	0.49	5
P18	2.38	3	-3.35	22	2.48	2	-0.29	14	0.08	12	-0.69	14	0.62	9	1.79	1	0.37	7
P19	-1.83	18	-0.36	12	-0.35	12	0.20	11	0.26	11	-0.62	13	-1.20	19	-0.18	14	-0.62	19
P20	-3.55	21	-1.86	20	-0.63	15	-1.61	19	1.37	2	0.77	7	-0.33	14	0.75	8	-1.21	22
P21	-1.52	17	1.08	7	-1.93	20	-3.25	22	-0.79	16	0.65	8	-0.66	16	-0.17	13	-0.95	21
P22	-2.35	20	-0.77	14	-0.63	14	-1.98	20	0.59	9	1.04	5	0.49	10	-0.06	12	-0.84	20

P1-P22: 参见表1. P1-P22 please refer to Table 1.

3 讨论

松茸是一种外共生菌根菌,对生长环境要求苛刻,至今尚不能实现人工栽培。其营养价值及商业价值重大,是很多产区农民的主要收入来源,但由于缺乏科学管理,每年遭受破坏式开采,产量及质量均大幅下降。对其生态因子进行研究将有助于对松茸的生态进行科学保护,为松茸的保育促繁打下基础。

我国松茸主要分布于西南的横断山区以及东北的长白山区。这些地方均具有独特的气候条件,是全国重要的生物多样性中心。本文以全国22个松茸主产区的气候、植被、地形、土壤因子为研究对象,通过主成分分析法,对松茸生长环境进行适宜性评价,以找出影响松茸生长与分布的关键生态因子。结果发现,松茸的发生季节与产地的气候具有一定的相关性,松茸的发生季节刚好处于产地一年中气温相对较高、降雨量相对丰富的时期,表明松茸对气候环境的依赖,云南的松茸适宜气候期较长,这也决定了相对于其它产区,松茸的发生期也更长,东北产区由于气温及降雨量的关系,每年松茸的发生期相对较短。地形也是影响松茸分布的一个重要生态因子,调查发现,西南松茸发生地海拔一般较高,而且多生长在山峰的中上部,东北松茸分布的海拔相对较低,这种分布差异主要是受气温及植被的影响,当然也可能是较低海拔的松茸易遭受破坏式开采^[24],导致松茸发生地“越来越高”。植被是影响松茸生长的另一个重要因素,松茸发生地优势植被地域间差别很大。在东北主要以赤松林为主,间以少量蒙古栎、桦树、山杨等;云南及四川南部,主要是云南松林,并有少量的锥栗、高山栎;西藏及四川大部分产区,主要植被为高山栎,并有少量的杜鹃科植物分布,总的来说,松、栎是中国松茸最主要的共生植物,较少见到以铁杉、云杉为共生植物的松茸^[25]。松茸对土壤因子有一定的要求,其一般

生长在偏酸性的土壤中,而且土质较为疏松,有机质丰富。对22个生态因子进行评价后发现,海拔、砂粒含量、交换性铜、交换性锌、交换性铁、碱解氮、坡度是对松茸生长影响最大的生态因子,而交换性锰、郁闭度、粉粒、枯枝落叶厚度对松茸的生长影响较小,说明对地形、土壤因子对松茸的生长更为关键,在对松茸进行保育促繁的过程中,应更加重视保护松茸立地的土壤环境。对松茸产地生态因子进行聚类发现,松茸产地呈现一定程度的分化,在系数为5时,分为4个生态区,这4个生态区在气候、植被、土壤因子上存在一定程度的差异。通过比对各产区松茸ITS序列发现,其相似度均在98%以上,以前一直认为是一个种^[26],但由于各产地松茸分布相对独立,基本不存在遗传交流,因此,松茸是否已发生或将发生多大程度的遗传分化值得进行更深入的研究,这对松茸生态、物种、遗传多样性的保护具有重要意义。

参考文献 [References]

- 曾培炎. 中国西部开发信息百科(吉林延边卷) [M]. 长春: 吉林科技出版社, 2003: 152
- 廖丽娟, 金光洙. 松茸的化学成分及其药理作用的研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2010, 29 (1): 12-14 [Liao LJ, Jin GZ. A review on chemistry and pharmacology of *Tricholoma matsutake* Sing [J]. *Chin Wild Plant Resour*, 2010, 29 (1): 12-14]
- 李云. 珍稀共生食用菌松口蘑研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (15): 4468-4470 [Li Y. Research progress in precious ectomycorrhizal basidiomycete *Tricholoma matsutake* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, 35 (15): 4468-4470]
- 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 DC, He J. A study on geographic distributing and ecology of *Tricholoma matsutake* [J]. *Edib*

- Fungi China*, **25** (4): 14-17]
- 5 弓明钦, 王凤珍, 陈羽, 陈应龙, 曹嘉相, 苏联军. 保护松茸生态环境促进松茸可持续发展——关于恢复与发展云南松茸的探讨[J]. 林业科学研究, 2000, **13** (5): 562-567 [Gong MQ, Wang FZ, Chen Y, Chen YL, Cao JX, Su LJ. Protecting the eco-environment of *Tricholoma matsutake* and improving its sustainable development [J]. *For Res*, 2000, **13** (5): 562-567]
 - 6 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. Ecological environment of *Tricholoma matsutake* in Chuxiong and Zhongdian, Yunnan province [J]. *Edible Fungi China*, 2002, **21** (3): 19-20]
 - 7 高明文, 代贤才. 川西高原的松茸生态[J]. 中国食用菌, 1996, **15** (6): 34-35 [Gao MW, Dai XC. Ecology of *Tricholoma matsutake* in western Sichuan [J]. *Edible Fungi China*, 1996, **15** (6): 34-35]
 - 8 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, **18** (3): 53-57 [Xu GB, Fu WJ, Wei TZ, Liang YJ, Yang SR, Quan MD, Li GH. Soil ecological characteristics of *Tricholoma matsutake* producing area in Changbai mountains region [J]. *J Jilin Agric Univ*, 1996, **18** (3): 53-57]
 - 9 王丹, 李恋卿, 刘永卓, 潘根兴. 不同施肥处理对太湖地区水稻土团聚体粒组细菌和真菌组成和多样性的影响[J]. 土壤, 2012, **44** (2): 290-296 [Wang D, Li LQ, Liu YZ, Pan GX. Influences of long-term fertilization on bacteria and fungi community structures in different aggregate-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China [J]. *Soils*, 2012, **44** (2): 290-296]
 - 10 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 张文菊, 李兆强, 张敬业. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (11): 2792-2798 [Sun FX, Zhang WH, Xu MG, Zhang WJ, Li ZQ, Zhang JY. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (11): 2792-2798]
 - 11 谢景欢, 陈钢, 袁巧霞, 林贵英, 王志山, 郭聪颖, 钟辉. 沼渣与化肥配合施用对温室番茄生长发育、产量及品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (9): 2353-2357 [Xie JH, Chen G, Yuan QX, Lin GY, Wang ZS, Guo CY, Zhong H. Effects of combined application of biogas residues and chemical fertilizers on greenhouse tomato's growth and its fruit yield and quality [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (9): 2353-2357]
 - 12 朱宝国, 张春峰, 于忠和, 贾会彬, 郭泰, 孟庆英, 王囡囡, 马晓明. 控释尿素和普通尿素配施对土壤氮含量及大豆产量和品质影响[J]. 中国农学通报, 2012, **28** (18): 140-143 [Zhu BG, Zhang CF, Yu ZH, Jia HB, Guo T, Meng QY, Wang NN, Ma XM. Effect of combined application of controlled release urea and common urea on soil nitrogen content and yield and quality of soybean [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, **28** (18): 140-143]
 - 13 张玉革, 梁文举, 姜勇. 不同利用方式下潮棕壤交换性钙镁的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (4): 813-818 [Zhang YG, Liang WJ, Jiang Y. Profile distribution of exchangeable calcium and magnesium in an aquic brown soil as affected by land use type [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (4): 813-818]
 - 14 陶冶, 王丹, 刘彤, 蒋成国, 翟伟, 李勇冠, 唐诚. 天山北部拟南芥生存群落特征及其与环境的关系[J]. 生物多样性, 2009, **17** (1): 51-61 [Tao Y, Wang D, Liu T, Jiang CG, Zai W, Li YG, Tang C. Community characteristics of *Arabidopsis thaliana* natural populations in the northern Tianshan Mountains along with relevant environmental factors [J]. *Biodivers Sci*, 2009, **17** (1): 51-61]
 - 15 代力民, 唐立娜, 曹玉明, 王顺忠, 周莉, 王庆礼. 辽东山区生态土地分类中的植物群落数量分析[J]. 林业科学, 2008, **44** (3): 6-12 [Dai LM, Tang LN, Cao YM, Wang SZ, Zhou L, Wang QL. Quantitative classification and ordination aiming to realize ecological land classification for the mountainous region in Eastern Liaoning Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (3): 6-12]
 - 16 Rahman MR, Shi ZH, Chongfa C. Soil erosion hazard evaluation—an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies [J]. *Ecol Model*, 2009, **220** (13): 1724-1734
 - 17 Li K, Fu S, Yang ZZ. Composition, distribution and characterization of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the soil in Taiyuan, China [J]. *Bull Environ Contam Tox*, 2008, **81** (6): 588-593
 - 18 周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文. 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. 环境科学, 2013, **34** (3): 864-873 [Zhou R, Peng ST, Tan XB, Shi HH, Ding DW. Phytoplankton assemblages and their relation to environmental factors by multivariate statistic analysis in Bohai Bay [J]. *Environ Sci*, 2013, **34** (3): 864-873]
 - 19 Borůvka L, Vacek O, Jehlička J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2005, **128** (3): 289-300
 - 20 吴薇薇, 曹青原. 重庆市环境可持续发展指标系统的构建及评价分析[J]. 三峡环境与生态, 2008, **1** (2): 56-61 [Wu WW, Cao QY. Establishment and evaluation of environment sustainable development index system in Chongqing [J]. *Environ Ecol Three Gorges*, 2008, **1** (2): 56-61]
 - 21 赵湘桂, 曹艳霞, 张杰, 王备新, 蔡德所. 影响漓江底栖动物群落的主要环境因素解析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, **27** (2): 137-141 [Zhao XG, Cao YX, Zhang J, Wang BX, Cai DS. Factor analysis of environmental variables influencing benthic macroinvertebrate community in Lijiang river [J]. *J Guangxi Norm Univ (Nat Sci)*, 2009, **27** (2): 137-141]
 - 22 廖桂堂, 李廷轩, 王永东, 张锡洲, 冯娜娜. 基于GIS和地统计学的低山茶园土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2007, **27** (5): 1978-1986 [Liao GT, Li TX, Wang YD, Zhang XZ, Feng NN. Comprehensive evaluation of fertility quality in hilly tea plantation soils based on GIS and geostatistics [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (5): 1978-1986]
 - 23 庞凤, 陶晓秋, 黄玫, 叶利华, 张海燕, 杨雪, 韶济明. 四川省植烟区土壤肥力评价[J]. 中国烟草科学, 2013, **34** (1): 40-44 [Pang S, Tao XQ, Huang M, Ye LH, Zhang HY, Yang X, Shao JM. Evaluation on soil fertility in Sichuan tobacco planting areas [J]. *Chin Tob Sci*, 2013, **34** (1): 40-44]
 - 24 陈荣民, 张春风, 张虎. 松茸生态及人工增产技术综述[J]. 中国林副特产, 2003 (4): 21-22 [Chen RM, Zhang CF, Zhang H. A review of ecology and artificial technology of *Tricholoma matsutake* [J]. *For By-Prod Spec China*, 2003 (4): 21-22]
 - 25 Endo N, Dokmai P, Suwannasai N. Ectomycorrhization of *Tricholoma matsutake* with *Abies veitchii* and *Tsuga diversifolia* in the subalpine forests of Japan [J]. *Mycoscience*, 2015, **56** (4): 402-412
 - 26 李强, 李小林, 黄文丽, 熊川, 杨志荣, 郑林用. 基于rDNA ITS和ISSR标记研究四川松茸遗传多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (4): 578-583 [Li Q, Li XL, Huang WL, Xiong C, Yang ZR, Zheng LY. Genetic diversity research of Sichuan *Tricholoma matsutake* based on rDNA-ITS sequencing and ISSR analysis [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (4): 578-583]