

· 专题 ·

冬虫夏草无公害仿生态繁育技术[△]杨俐¹, 李全平², 陈士林¹, 邱健健², 李文佳^{2*}, 向丽^{1*}

(1. 中国中医科学院中药研究所/中药鉴定与安全性检测评估重点实验室, 北京 100700;

2. 广东东阳光药业有限公司/国家中医药管理局重点研究室, 广东 东莞 523850)

[摘要] 冬虫夏草为中国传统名贵中药材, 由于生态环境破坏、不合理采挖等, 造成资源稀缺, 甚至濒临灭绝。野生冬虫夏草受自然环境的影响, 不同产地品质差异较大, 且大部分区域砷含量超标。进行无公害仿生态繁育是缓解野生冬虫夏草资源匮乏、降低砷含量、实现资源可持续利用的有效措施。广东东阳光有限公司冬虫夏草繁育与产品研发重点研究室经过十余年的研发, 创建了无公害冬虫夏草仿生态繁育技术体系, 并通过农业部《无公害农产品》认证。本文从产地环境要求、优质菌种和寄主资源选育、仿生态繁育技术、病虫害综合防治等方面论述了冬虫夏草的无公害仿生态繁育技术; 通过严格控制各生产环节繁育无公害和高品质的冬虫夏草, 推动冬虫夏草产业现代化发展。

[关键词] 冬虫夏草; 无公害; 仿生态繁育; 病虫害综合防治

The Pollution-free Ecological Cultivation Technology of *Cordyceps sinensis*YANG Li¹, LI Quan-ping², CHEN Shi-lin¹, QIU Jian-jian², LI Wen-jia^{2*}, XIANG Li^{1*}

(1. Key Laboratory of Beijing for Identification and Safety Evaluation of Chinese Medicine, Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China;

2. Key Laboratory of State Administration of Traditional Chinese Medicine, Sunshine Lake Pharma Co., Ltd., Dongguan 523850, China)

[Abstract] *Cordyceps sinensis* (*Ophiocordyceps sinensis*) is a traditional Chinese herbal medicine. Due to the destruction of ecological environment and unreasonable mining, resources are scarce and even endangered. The wild *C. sinensis* is affected by the natural environment, and the quality of different producing areas is quite different, and the arsenic content in most areas exceeds the standard. Carrying out pollution-free ecological cultivation is an effective measure to solve the problem of the shortage of wild *C. sinensis* resources, reducing arsenic content and realizing the sustainable development and utilization of resources. After more than ten years of research and development, Guangdong Sunshine Lake Pharma Co., LTD has developed a non-polluted *C. sinensis* ecological cultivation technology system and passed the "Non-pollution Agricultural Products" certification by the Ministry of Agriculture. In this paper, the methods of pollution-free ecological cultivation of *C. sinensis* are discussed from the aspects of environmental requirements, excellent strains and host resource selection, ecological cultivation techniques, and integrated prevention of pests and diseases. Through strict control of various production links, pollution-free and high-quality *C. sinensis* can be cultivated, promoting the modernization of *C. sinensis* industry.

[Keywords] *Cordyceps sinensis* (*Ophiocordyceps sinensis*); pollution-free; ecological cultivation; integrated prevention of pests and diseases

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20180903005

冬虫夏草为麦角菌科真菌冬虫夏草菌 *Cordyceps sinensis* (Berk) Sacc. 寄生在鳞翅目蝙蝠蛾科 Hepialidae 昆虫幼虫上的子座和幼虫尸体的干燥复合体^[1],

是我国传统名贵中药, 与人参、鹿茸并列为我国“中药三宝”^[2]。冬虫夏草始载于公元8世纪的《月王药诊》, 用于治疗肺部疾病, 随后历代医药典籍对

[△] [基金项目] 国家自然科学基金项目(81503192); 国家中药标准化项目(ZYBZH-C-JX-39)

* [通信作者] 李文佳, 工程师, 研究方向: 中药资源; E-mail: liwenjia@hec.cn
向丽, 副研究员, 研究方向: 中药资源; E-mail: 915101021@qq.com

冬虫夏草均有不同程度的记载^[3], 收载于历版《中华人民共和国药典》(《中国药典》), 具有补肾益肺, 止血化痰的功效。现代研究表明冬虫夏草具有免疫调节、抗菌、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖、降血脂等多种作用^[4-5]。冬虫夏草主要生长于海拔3500~5000 m的高山灌丛和草甸, 国内主要分布于西藏、青海、四川、云南、甘肃, 国外在尼泊尔、不丹有少量分布^[6-7]。近年来全球气候变暖, 雪线抬高, 导致冬虫夏草适宜生境面积不断减少, 加之人们过度采挖, 导致冬虫夏草野生资源锐减, 同时对产区植被和生态环境造成严重破坏, 直接或间接导致冬虫夏草野生资源日渐枯竭^[8]。野生冬虫夏草已列为国家二级保护植物。

20世纪70年代以来, 国内外有开始进行繁育冬虫夏草的研究, 近年来, 冬虫夏草的仿生态繁育技术获得产业化成功^[9-10]。冬虫夏草仿生态繁育是通过模拟冬虫夏草生长过程与环境的关系进行繁育, 可以在室内模拟适宜生态环境, 进行菌种繁殖、寄主昆虫饲养、菌种侵染、子实体的生长发育, 也可以在室内进行菌种扩繁、寄主昆虫卵和成虫的饲养, 然后选择适宜生境放养感菌(未感菌)幼虫, 在野外完成冬虫夏草生长过程。研究表明仿生态繁育的冬虫夏草与野生冬虫夏草在虫种、菌种、形态外观、显微结构、化学成分、有效性等方面均一致, 重金属砷的含量低, 符合《中国药典》标准及《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》有关规定^[11-13]。野生冬虫夏草由于受到产地环境、冬虫夏草菌自身吸附特性及砷氧化细菌共生等影响, 普遍砷含量超标, 而冬虫夏草繁育品由于生态环境相对野生冬虫夏草可控性高, 在控制重金属砷含量方面具有优势, 安全性高。

无公害仿生态繁育冬虫夏草在种质资源选育优质化、繁育过程规范化、采收及产地初加工科学化、流通体系可溯源化、质量控制数据化等全生命周期管控相较于野生冬虫夏草具有显著优势, 也是产品稳定均一、安全有效、质量可控的重要保障。无公害仿生态繁育冬虫夏草产业化的成功, 既有利于解决资源短缺、生产难以为继的问题, 也利于提高冬虫夏草的质量、规范冬虫夏草市场、保护高原生态环境和资源, 为冬虫夏草野生资源可持续发展提供了一条途径, 是其他濒危珍稀中药材仿生态繁育的典范。本文从产地环境要求、优良种质资源选育、菌种繁殖、寄主昆虫饲养、菌种侵染、病虫害综合

防治方面论述了冬虫夏草的无公害仿生态繁育的方法, 以期指导实际生产, 促进冬虫夏草的仿生态繁育。

1 无公害冬虫夏草产地环境要求

无公害冬虫夏草生产的产地土壤必须符合 GB 15618—2018农用地土壤污染风险筛选值和管制值的使用相关要求, 空气环境质量应符合 GB 35749—2012 二类区要求, 生产用水质量必须符合 GB 5749—2006 标准的规定。产地应选生态环境条件良好的地区, 产地区域和生产用水上游无或不直接接受工业“三废”、城镇生活、医疗废弃物等污染, 避开公路主干线、土壤重金属含量高的地区^[14-15]。冬虫夏草普遍存在重金属砷含量超标的问题, 由于菌类特殊的细胞结构, 对土壤中砷具有较强的富集作用^[16], 而冬虫夏草产地土壤中的砷含量普遍较高, 达不到无公害农产品土壤质量要求^[17]。因此在产地选择上尤其要注意土壤砷含量, 要求达到无公害农产品土壤环境质量标准中土壤质量要求。

冬虫夏草对环境选择性极强, 青藏高原特定的气候条件和地理因素对其药效和品质的形成有关键作用^[9]。冬虫夏草按产地不同可分为藏草(主要产于青海、西藏)、川草(主要产于四川)和滇草(主要产于云南)。产地的温度、光照、水分、土壤、地形等对虫体和菌生长发育有极大的影响, 适宜环境因子见表1。冬虫夏草适宜生长区域环境年均温-5.5~4.2℃, 年均降水量409~756 mm, 年均相对湿度39.7%~46.9%, 年均日照141.9~157.1 W·m⁻²^[18]。土壤环境显著影响蝙蝠蛾幼虫的生长发育和活动、种群数量、冬虫夏草菌核及子座的形成。冬虫夏草适宜土壤类型有高寒的高原草甸土、山地草甸土和高山草甸土, 以高原草甸土较多, 土壤要求腐殖质丰富、有机质含量高、土层深厚, 以石头或粉状小块及碎屑结构为宜, 孔隙性好, 质地疏松的砂壤土或轻壤土^[19]。土壤表面应有较密集的草根盘结层, 能保护土层不受侵害。土层15~25 cm深处, 含水量应达40%~50%, 有机质含量应在15%左右, 土壤pH应在5.0~6.5。这类土壤对寄主幼虫入土觅食、保温保湿、栖身防敌、老熟幼虫化蛹、成虫羽化等生长发育过程有重要作用。地形以海拔3000~5000 m的向阳背风的山坡或隆起的小山脊较好, 有茂密草地或间有稀疏灌丛的草地, 含高山草甸植被

和亚高山草甸植被,群落植物种类应以蓼科、禾本科、莎草科、毛茛科为建群种,蓼科中的珠芽蓼、圆穗蓼的盖度最好达50%以上,此外蔷薇科、龙胆科、百合科等植物也可占一定的比例,这些草本植物可满足寄主幼虫不同生长发育阶段所需多种营养成分的需要。

表1 冬虫夏草适宜产地环境条件

环境因子类型	具体参数
年均日照/W·m ⁻²	141.9~157.1
年平均气温/℃	-5.5~4.2
最热月最高温度/℃	10.8~18.6
最冷月最低温度/℃	-26.1~-14.1
气温年较差/℃	30.9~38.8
最湿季度平均温度/℃	4.2~11.4
最干季度平均温度/℃	-15.8~-3.2
最热季度平均温度/℃	4.2~11.4
最冷季度平均温度/℃	-16.2~-4.1
年均相对湿度(%)	39.7~46.9
年降水量/mm	409~756
最湿月降水量/mm	88~179
最干月降水量/mm	1~4
最湿季度降水量/mm	239~484
最干季度降水量/mm	6~14
最热季度降水量/mm	239~484
最冷季度降水量/mm	7~14
海拔/mm	3000~5000
土壤类型	高原草甸土、山地草甸土、高山草甸土、亚高山草甸土
土壤湿度(%)	40~50
植被类型	高山、亚高山草甸,高寒灌丛,高寒草甸

2 冬虫夏草优良种质选择

2.1 优质菌种选育

《中国药典》2015年版规定的冬虫夏草菌种为冬虫夏草菌 *Cordyceps sinensis* (Berk) Sacc., 但在最新的分类系统中冬虫夏草菌属于子囊菌门粪壳菌纲肉座菌目线性虫草科 Ophiocordycipitaceae 线性虫草属 *Ophiocordyceps*, *Ophiocordyceps sinensis*^[20]。仿生态繁育中首要的是筛选出侵染寄主昆虫后能长出子实体的菌株。几十年以来,研究人员从各个产地采集的冬虫夏草中分离出的真菌涉及10个属30多种,如蝙蝠蛾拟青霉、中国拟青霉、蝙蝠蛾被孢霉、虫草头孢霉、中国被毛孢、中国弯颈霉、中国金孢霉等(见表2)。现代研究证明冬虫夏草的无性型为中国被毛孢,是仿生态繁育实际生产用菌种的主要来源,其菌丝白色,菌苔灰白色,菌落呈茸状、圆形,气生菌丝发达,菌丝体有鲜香菇气味^[21]。优质菌种生长迅速,能降低病虫害感染率,降低管理难度,提高侵染率和成草率,宜选择健康、健壮、具备产生子座能力的中国被毛孢作为侵染菌株^[22]。

2.2 优质虫种选育

冬虫夏草寄主昆虫具有丰富的种质资源,其寄主昆虫主要为鳞翅目 Lepidoptera 有喙亚目 Glossata 外孔次目 Exoporia 蝙蝠蛾总科 Hepialoidae 昆虫^[10]。到目前为止,研究发现了60余种冬虫夏草寄主昆虫,仅限于蝙蝠蛾科,包括蝠蛾属、拟蝠蛾属、无钩蝠蛾属、钩蝠蛾属,以钩蝠蛾属、无钩蝠蛾属居多^[19]。寄主昆虫有区域分布和垂直分布的规律,

表2 冬虫夏草无性型研究汇总

冬虫夏草相关菌种	来源	与冬虫夏草的关系
中国被毛孢 <i>Hirsutella sinensis</i>	四川康定、甘肃	确认为冬虫夏草无性型
冬虫夏草头孢 <i>Cephalosporium sinensis</i>	青海	
中国拟青霉 <i>Paecilomyces sinensis</i>	四川康定	
蝙蝠蛾被孢霉 <i>Mortierella hepialid</i>	四川汶川	
中国弯颈霉 <i>Tolypocladium sinensis</i>	云南	
蝙蝠蛾拟青霉 <i>Paecilomyces hepialid</i>	云南迪庆	
中华束丝孢 <i>Synnematium sinensis</i>	青海化隆、玉树	冬虫夏草头孢同物异名
中国金孢霉 <i>Chrysosporium sinensis</i>	四川米亚罗	
蝙蝠蛾被毛孢 <i>Hirsutella hepialid</i>	青海	中国被毛孢同物异名
虫花棒束孢 <i>Isaria farinose</i>	青海	归为粉拟青霉

不同地区、不同海拔、甚至同一山脉不同的坡向都可以形成不同种类。除虫草钩蝠蛾为广域分布种,在西藏、青海、四川、云南、甘肃均有分布,其余种类分布狭窄,各产区寄主昆虫种类见表3。寄主昆虫的品种不同,其饲养难度、冬虫夏草形成率和品质差异较大,仿生态繁育另一首要任务便是要选出适宜冬虫夏草产业化繁育的寄主种质资源,然后对表现优异的虫种通过遗传育种学的理论和技术,筛选出优良的寄主昆虫^[23]。优质虫种应该具有不退化、繁殖快、易被中国被毛孢侵染、出草率高且品质好的特征^[13]。目前发现冬虫夏草优势寄主有:西藏产地钩蝠蛾,青海产地玉树无钩蝠蛾,四川产地贡嘎钩蝠蛾、小金蝠蛾、斜脉蝠蛾,云南产地白马钩蝠蛾、人支钩蝠蛾、德钦钩蝠蛾和玉龙无钩蝠蛾,甘肃产地门源无钩蝠蛾、玉树无钩蝠蛾^[24-26]。

3 无公害冬虫夏草繁育方法

3.1 冬虫夏草菌种扩繁

3.1.1 菌种分离纯化 冬虫夏草菌可用组织分离方法从冬虫夏草子座和虫体内分离得到,也可用于囊孢子分离法获得子囊孢子。组织分离法要选取新鲜、完整及子座饱满的冬虫夏草,将冬虫夏草虫体外的菌膜与土粒剥去,用毛刷洗净表面泥土,以流水冲洗干净,在无菌条件下用75%乙醇进行表面消毒后,以无菌手术刀削去虫体和子座的表皮,将其切

成小块,在切虫体时注意不能碰到昆虫肠道,然后将组织小块接种于培养基上^[27]。组织分离法比较简单,成功率也比较高,一般在80%以上。子囊孢子分离法一般选择新鲜、子座可孕膨大、子囊壳清晰的冬虫夏草,可以在箱内套袋采集或自制玻璃采集器,将采集的子囊孢子浸泡在1:10的土壤浸出液中,在1000 r·min⁻¹离心机上离心10 min,依次用10%、20%的蔗糖溶液分别洗涤后离心2次,再用50%蔗糖溶液离心3 min,弃上清液后,采集浮于液面的子囊孢子,在无菌条件下接种于培养基上,在适宜温度下培养,直至长出单个菌落^[28]。子囊孢子分离法比较复杂,分离的子囊孢子要注意保持活性。

3.1.2 冬虫夏草菌培养 采用固体试管斜面,或三角瓶装固体培养基或培养料消毒灭菌后,将分离纯化的冬虫夏草菌接种在培养基上,在12~20℃下培养。在摇瓶内装入营养液,将培养好的母种接入瓶内,通过振荡使瓶中的氧气含量增加,液态培养基便于菌体充分接触和吸收营养,生长和繁殖加快。液体菌种产孢后可直接用于培植冬虫夏草,也可用发酵罐进一步扩大繁殖。冬虫夏草菌生长的温度控制在12~20℃,20℃菌丝生长快,当温度高于25℃,菌丝不再生长。冬虫夏草培养基成分可以有多种,主要以葡萄糖为碳源、以蛋白胨为氮源。同时需要添加适量的酵母提取物、磷酸二氢钾、硫酸镁、微量元素,可以促进菌丝生长。液体培养最适的pH范围为5~6,摇床适

表3 冬虫夏草寄主昆虫种类

属	种
钩蝠蛾属 <i>Thitarodes</i>	虫草钩蝠蛾 <i>T. armoricanus</i> *, 理塘钩蝠蛾 <i>T. litangensis</i> , 康定钩蝠蛾 <i>T. kangdingensis</i> , 康姬钩蝠蛾 <i>T. kangdingroides</i> , 贡嘎钩蝠蛾 <i>T. gonggaensis</i> *, 曲线钩蝠蛾 <i>T. fusconebulosa</i> , 赭褐钩蝠蛾 <i>T. gallicus</i> , 白线钩蝠蛾 <i>T. nubifer</i> , 德氏钩蝠蛾 <i>T. davidi</i> , 小金钩蝠蛾 <i>T. xiaojincusis</i> *, 德钦钩蝠蛾 <i>T. deqingensis</i> *, 白马钩蝠蛾 <i>T. baimaensis</i> *, 梅里钩蝠蛾 <i>T. esmeiliensis</i> , 美丽钩蝠蛾 <i>T. callinivalis</i> , 锈色钩蝠蛾 <i>T. ferrugineus</i> , 永胜钩蝠蛾 <i>T. yongshengensis</i> , 宽兜钩蝠蛾 <i>T. latitegumenus</i> , 叶日钩蝠蛾 <i>T. yeriensis</i> , 中支钩蝠蛾 <i>T. zhongzhiensis</i> , 草地钩蝠蛾 <i>T. pratensis</i> , 双带钩蝠蛾 <i>T. bibelteus</i> , 白纹钩蝠蛾 <i>T. albipictus</i> , 金沙钩蝠蛾 <i>T. jinshaensis</i> , 人支钩蝠蛾 <i>T. renzhiensis</i> *, 斜脉钩蝠蛾 <i>T. obliquifurcus</i> *, 循化钩蝠蛾 <i>T. xunhuaensis</i> , 甲郎钩蝠蛾 <i>T. jialangensis</i> , 芒康钩蝠蛾 <i>T. markamensis</i> , 察里钩蝠蛾 <i>T. zaliensis</i> , 南木林钩蝠蛾 <i>T. nanmlinensis</i> , 亚东钩蝠蛾 <i>T. yadongensis</i> , 比如钩蝠蛾 <i>T. biruensis</i> , 定结钩蝠蛾 <i>T. dinggyensis</i> , 纳木钩蝠蛾 <i>T. namensis</i> , 当雄钩蝠蛾 <i>T. damxungensis</i> , 巴青钩蝠蛾 <i>T. baqingensis</i> , 蒲氏钩蝠蛾 <i>T. Pui</i> , 色吉拉钩蝠蛾 <i>T. sejilaensis</i> , 加查钩蝠蛾 <i>T. jiachaensis</i> , 白带钩蝠蛾 <i>T. cingulatus</i>
无钩蝠蛾属 <i>Ahamus</i>	四川无钩蝠蛾 <i>A. sichuanensis</i> , 德格无钩蝠蛾 <i>A. alticola</i> , 石纹无钩蝠蛾 <i>A. carna</i> , 玉龙无钩蝠蛾 <i>A. yulongensis</i> *, 丽江无钩蝠蛾 <i>A. lijiangensis</i> , 剑川无钩蝠蛾 <i>A. jianchuanensis</i> , 异翅无钩蝠蛾 <i>A. anomopterus</i> , 云南无钩蝠蛾 <i>A. yunnanensis</i> , 云龙无钩蝠蛾 <i>A. yunlongensis</i> , 玉树无钩蝠蛾 <i>A. yushuensis</i> *, 杂多无钩蝠蛾 <i>A. zadoiensis</i> , 刚察无钩蝠蛾 <i>A. gangcaensis</i> , 门源无钩蝠蛾 <i>A. menyuanensis</i> *, 察隅无钩蝠蛾 <i>A. zhayuensis</i> , 玛曲无钩蝠蛾 <i>A. maquensis</i> , 碌曲无钩蝠蛾 <i>A. luquensis</i>
拟蝠蛾属 <i>Parahepialus</i>	暗色拟蝠蛾 <i>P. nebulosus</i>
蝠蛾属 <i>Hepialus</i>	异色蝠蛾 <i>H. varians</i> , 东隅蝠蛾 <i>H. dongyuensis</i> , 条纹蝠蛾 <i>H. gannaensis</i> , 贵德蝠蛾 <i>H. guidera</i> , 拉脊蝠蛾 <i>H. lagii</i>

注:*冬虫夏草优势寄主昆虫。

宜转速为 $100 \sim 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ [19]。

3.2 寄主昆虫室内繁殖

3.2.1 饲料选择及饲养条件 光照、温度、湿度、土壤等环境因子以及饲料的种类和投放量对寄主昆虫的生长发育有极大的影响。不同寄主昆虫对温度与湿度的需求不同。饲养蝙蝠蛾幼虫过程中模拟高山草甸环境很重要，寄主昆虫的饲养温度一般在 $8 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，温度过高过低都不利于生长 [19]。饲养土壤以有机质含量多的腐殖土为宜，研究建议幼虫饲养的前期和中期土壤可用腐殖土和沙土混合作为基质，后期用纯沙土，土壤含水量控制在 $40\% \sim 60\%$ 。饲料是饲养寄主昆虫过程中的重要因素，饲料的营养和品质决定幼虫的体质和抗病能力。天然饲料主要来自 19 科 35 属的植物根茎部分，如莎草科 Cyperaceae、蓼科 Polygonaceae、禾本科 Gramineae、龙胆科 Gentianaceae 等，其中圆穗蓼、珠芽蓼、小大黄、苹果、胡萝卜、马铃薯等植物最受喜爱 [29]，初孵幼龄虫要投喂幼嫩新鲜的食物。人工饲料应该具有丰富的营养，能提供生长发育各阶段所需要的营养元素，幼虫饲料应具有高糖、高灰分、高钾、多种氨基酸 [9,30]。

3.2.2 蝠蛾幼虫的世代循环养殖 冬虫夏草寄主蝠蛾为完全变态昆虫，众多寄主蝠蛾虽然种类不同，但生物学特性差异不大，经历一个世代的虫态和时间差不多。在原产地的自然条件下，寄主蝠蛾一个完整的生活周期包括卵、幼虫、蛹和成虫，幼虫期最长，且世代重叠 [10]。养虫室应在干净、安静、无污染地方建立，由缓冲间、消毒室、操作间、幼虫室、成虫室、蛹室组成 [31]。成虫羽化后雌雄成虫按 1:2.5 的比例捕捉置容器中交配、产卵，成虫不需要补充营养，不必投喂食物，只要保持环境中的水分和温度适宜，雌雄蛾即能正常存活和交尾产卵。卵产出后应及时收集，用灭菌水洗净表面的杂质，平铺放置在湿润的滤纸、土壤等保湿基质上孵化，在无菌黑暗条件下，控制温度在 $15 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ，空气相对湿度 $70\% \sim 80\%$ 。卵的孵化期约 1 个月，可在孵化的第 25 天加入消毒处理的饲料 [32]。幼虫习性是在土中建筑巢穴生活，取食植物根茎，土壤要求疏松、保湿、透气性良好的高山草甸土和亚高山草甸土，饲料最好采用蓼科植物珠芽蓼、圆穗蓼根茎，也可以用禾本科、莎草科的嫩根饲养，在低海拔地区还可以用胡萝卜、红薯、苹果等人工饲料饲养。温度

宜控制在 $12 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，空气相对湿度 $70\% \sim 85\%$ ，土壤含水量 $40\% \sim 50\%$ ，加水应采取喷雾或少量滴加的方法。幼虫期长达 6 龄，是病虫害致死最严重的时期，要注意保持无菌环境。饲养一段时间后应当及时添加新的饲料，将新鲜饲料直接放置在原有土壤饲料的上面。若幼虫排泄的粪便多，杂菌滋生，环境恶化，应当及时整体更换。轻轻翻倒养虫容器，倒出其中的土壤、幼虫及饲料，然后用镊子将幼虫轻轻从中取出，放入装好新的土壤饲料的养虫容器中。幼虫体壁柔软娇嫩，饲养时除了必要的观察、换土和饲料外，应尽量减少翻动，避免人为造成损伤，土壤必须经过筛检除去粗硬杂质石砾，以免擦伤虫体引致病害 [22]。蛹在土穴中生活，先将土壤压实，然后用比蛹体稍粗的工具人工造土穴，土穴略斜，深约 $2 \sim 3 \text{ cm}$ ，每穴放 1 个蛹，蛹头向上，穴口用细土掩盖。蛹期控制相对湿度 $80\% \sim 85\%$ ，土壤含水量 $40\% \sim 50\%$ ，温度 $12 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.3 菌种侵染寄主昆虫

菌种侵染寄主昆虫是保证仿生态繁育冬虫夏草成功的最关键环节。冬虫夏草菌与寄主昆虫之间存在着协同进化关系，不同产地的菌种对应不同的蝙蝠蛾幼虫有不同的侵染率，一般同一或相近产地的菌种和虫种之间的侵染率比较高 [13,33]。在野生自然环境下，蝙蝠蛾幼虫的侵染率极低，仿生态繁育冬虫夏草中，所采用的侵染方式不一。主要的侵染途径有通过昆虫体壁或表皮、口器或气孔等自然孔口或肠道等消化道侵染，但具体到每一种虫生真菌，各自都有自己主要的侵入特征 [34]。根据主要的侵染途径分别发明了针刺、拌入饲料喂食、表皮涂抹、浸泡及喷雾等接种方法，都有较好的效果 [10]。接种宜选择寄主昆虫抗菌力薄弱的蜕皮期和幼虫取食活动旺盛摩擦损伤较大的时期，结合理想的侵染工艺进行。

3.4 冬虫夏草无公害仿生态繁育管理技术

3.4.1 冬虫夏草室内仿生态繁育 室内仿生态繁育是将从高原草甸收集到的蝙蝠蛾卵及冬虫夏草菌在完全模拟高原地带气候环境的仿生态繁育气候室内进行选育及繁殖，历经幼虫生长、菌种扩繁、侵染、菌核形成及子座生长等过程进而繁育出冬虫夏草。广东东阳光有限公司冬虫夏草繁育与产品研发重点实验室经过十余年的研发，创建了无公害冬虫夏草仿生态繁育技术体系，打造数十万平方米的仿生态

繁育气候室。幼虫生长、菌种扩繁参考 3.1、3.2 的方法,菌种侵染主要是喷雾接种或撒播接种,当幼虫僵化后,取出幼虫集中在专用容器中培植。僵虫头部朝上种植在土壤内,距离土表面深度不超过 2~3 cm。此时子实体的发育极为关键,应控制好温度、湿度、土壤 pH 值以及光照。气温控制在 10~20℃,空气相对湿度 70%~85%,土壤含水量 40%~50%,pH 5.0~5.5;每天给以适当的散射光照^[10]。室内仿生态繁育通过选择砷含量低的土壤,同时加强饲料及土壤理化性质的检测、环境的洁净管理,保障繁育出的冬虫夏草重金属及砷含量不超标,是有效解决冬虫夏草砷含量超标问题的主要措施。

3.4.2 冬虫夏草半野生繁育 半野生繁育冬虫夏草是菌种扩繁、寄主昆虫的卵、成虫阶段在室内控制条件下完成,然后将感菌(未感菌)的寄主幼虫放回冬虫夏草适宜产地,完成冬虫夏草生长形成阶段。半野生繁育选地应符合冬虫夏草适宜产地环境要求,主要是在高海拔地区进行,充分利用高原生态环境的温度、湿度、气压等条件,有利于提高单位面积产量和降低培育的成本。寄主昆虫放养入土是半野生培植的关键之一,放养数量视草场食料植物多少而定,饲料充足可适当增加,反之也可适当减少。虫口密度适度,数量过多幼虫相互争夺生存空间易导致死亡,过少又会造成土地的浪费,在同一地块内每年投放幼虫,一个生活周期后,可持续产出冬虫夏草。放养卵可采用疏松湿润的腐殖质或疏松湿润的高山草甸土将卵均匀分散,按 70~80 粒·m⁻²撒播在草地上,幼虫孵出后自行爬行入土觅食生活。放养幼虫宜选初孵幼虫或饲养至 1~2 龄的小幼虫放养入土,若虫龄过长、虫体过大会增加入土困难,在入土过程中容易被草根、土块、石砾擦伤造成死亡,一般情况幼虫以 50~60 头·m⁻²为宜。以撒播法接种。培植地应根据山势坡向开沟排水,防止积水或灌淹。投放卵或幼虫时及投入后的 1 周内,要洒水或人工遮阴,以保持土壤呈湿润状态且避免阳光直射,以防造成卵或幼虫脱水死亡。为避免造成伤害,对投放寄主昆虫的地块应采取保护措施,禁止放牧,禁止人畜践踏,防止鸟类啄食。

相对来讲,由于受到自然条件的不确定性影响,传统的半野生繁育方式不稳定;生产的冬虫夏草品质参差不齐,且产量也不稳定;而通过模拟高原生态环境进行冬虫夏草的室内繁育过程可控,产品质

量、产量均能达到要求,具有较大的优势^[13]。目前广东东阳光有限公司成功实现大规模工业化的冬虫夏草室内仿生态繁育,繁育的冬虫夏草通过湖北省《无公害农产品产地》及农业部《无公害农产品》认证,并随着科技进步,不断向实现生产操作机械化、生产环境调控智能化努力,使冬虫夏草产业化繁育朝高效优质、现代化管理的先进生产方式发展。

4 冬虫夏草无公害病虫害综合防治

冬虫夏草仿生态繁育过程病虫害较多,现已知的多达 20 余种。病虫害主要集中在寄主昆虫上,包括真菌、细菌、线虫、寄生昆虫、天敌捕食以及机械损伤,其中以感染病菌致死率最高,寄生昆虫和线虫等发生较少,室内养殖一般无天敌(见表 4)。机械损伤较为常见,虽然不会造成直接死亡,但伤口易感染病菌,造成寄主昆虫死亡。

病害分真菌病害和细菌病害。常见的病原真菌有拟青霉、绿僵菌、白僵菌、红僵菌等^[35]。病害目前仍无有效、安全的防治药剂,以预防为主,综合防治,提倡无公害饲养,主要应控制人工饲养蝠蛾环境中的微生物^[19,36]。对室内环境全面消毒,虫室应进行熏蒸消毒。水、饲料等物质进入虫室时先消毒灭菌,水使用无菌蒸馏水,基质(腐殖土)先暴晒,再进行常规高温高压灭菌后方可进入虫室,养虫用的器材、容器也要定期消毒,减少病原菌及寄生虫进入饲养环境。消毒可利用臭氧、微波、高温高压、紫外照射等方式,药剂使用应符合 NY/T 393—2013 绿色食品农药使用准则,禁止使用有毒有害药剂。保证饲料供给,增强虫体抗病性,随时检查,及时发现和剔除病、死虫体以防止病害传播。积极筛选抗病性高的种群,提倡杂交,防止种群退化。除此以外,养殖人员也应注意个人卫生,做好消毒工作,进入工作室更换经消毒处理的实验服,防止交叉污染。

虫害有螨虫、线虫、蚊虫、寄生蝇、寄生蜂等,线虫所占比例少,寄生性虫害极少发生。冬虫夏草采收后彻底清除表面杂质泥沙,以去除寄居在表面的螨(卵);加工使药材含水量降低到 15% 以下,使所带螨(卵)死亡;储藏过程中保持环境的干燥清洁,避免螨虫的进入和生长繁殖。药材用包装袋密封包装,有条件最好采用充气包装,可避免螨虫的为害。

表4 冬虫夏草主要病虫害及特征

类型	病虫害	发病特征
真菌病害	拟青霉	幼虫尸体略有伸长, 逐渐被满白色菌丝, 产生白粉状的分生孢子梗束和白粉状分生孢子。爆发速度快, 致死率高。
	绿僵菌	初期无明显病变, 2~3 d 发病。幼虫尸体僵化, 表面长满白色气生菌丝, 菌丝上长出卵圆形分生孢子, 颜色变绿, 最后形成鲜绿色粉被。血淋巴里含有绿僵菌虫菌体。致死率高。
	白僵菌	幼虫僵化后头部向前伸直, 虫体大小不变, 虫体节间长出白色菌丝, 后变成白色僵虫, 菌丝上产生卵圆形的分生孢子。致死虫较少。
	红僵菌	虫体略有缩小, 体表淡红色并有棕色菌丝缠绕。发病较少。
细菌病害	细菌	虫体不僵化, 虫体内部组织腐烂、发臭, 解剖虫体发现细菌菌体。致死虫较少。
虫害	线虫	死虫不僵化, 体表有大量线虫, 解剖虫体发现大量活的线虫。
	寄生蜂	寄生于幼虫体内, 致使幼虫不能化蛹。
	寄生蝇	寄生于幼虫体内以幼虫身体为营养基质, 导致幼虫死亡。

5 无公害冬虫夏草质量标准

无公害冬虫夏草是指农药、重金属及有害元素等多种对人体有毒物质的残留量均在限定范围以内的冬虫夏草。无公害质量指标包括药材的真伪、农药残留和重金属及有害元素限量、有效成分含量等。《中国药典》2015版规定冬虫夏草干燥品腺苷含量不得少于0.010%。冬虫夏草含有一定量的重金属, 无公害冬虫夏草中重金属含量应该符合《中国药典》2015年版规定, 重金属残留量铅 $\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉 $\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 砷 $\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 汞 $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铜 $\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。野生冬虫夏草铅、镉、铜等含量一般符合标准, 部分产地汞含量有超标, 而总砷大部分高于《中国药典》标准^[17,37]。冬虫夏草砷含量超标是人们质疑的关键点, 2016年因其砷含量超标, 国家食品药品监督管理局取消其用作保健品的资格。但多数研究表明, 植物中砷含量及形态跟动物、菌类不同, 植物类药材中砷主要以无机形态存在, 因而毒性较高, 冬虫夏草虽然总砷含量高, 但主要以无毒的有机砷形式存在^[38], 无机砷不超标^[39-41]。台湾地区2016年10月1日起对冬虫夏草药材砷含量已不做限量规定^[40]。但其总砷含量高的现状也不可忽略。其总砷含量高主要是由于产地土壤砷含量较高, 冬虫夏草菌自身对砷有一定的富集作用, 同时共生的砷氧化细菌有一定的促进作用, 因此要尤其注意仿生态繁育的土壤砷含量, 必须符合无公害农产品土壤环境质量标准, 同时还要加强生长和生产过程中的各项管控, 限制砷的其他来源。广东东阳光有限公司仿生态繁育的冬虫夏草重金属及砷含量符合《中国药典》及《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》有关规定, 通过了农业部《无公害农产品》认

证。此外要加强冬虫夏草中无机砷的研究, 对其所带来的健康风险能够有更精准的分析, 制定适宜的标准。冬虫夏草价格昂贵、资源紧缺, 常出现以假乱真、以次充好的现象, 市场上常见的混淆品有亚香棒虫草、凉山虫草、香棒虫草、分支虫草、新疆虫草、蛹虫草、阔孢虫草等, 伪品一般以其他材料冒充冬虫夏草虫体或子座, 经过人工模压和染色等手段造假, 也有添加金属粉等增重或美化外观等^[42]。针对市场上冬虫夏草混伪品, 通过性状、显微、理化与DNA分子鉴定等方法可鉴别^[43-44]。

6 展望

近年来, 冬虫夏草的繁育取得了重大突破, 产业化生产已经实现, 且冬虫夏草繁育品不存在重金属超标的问题, 也能满足药效要求, 可极大缓解野生冬虫夏草资源短缺及砷超标的问题。当然开展冬虫夏草繁育也有很多需要深入研究的领域, 如寄主昆虫种质资源十分丰富, 需继续深入研究优质虫种选育工作; 一些冬虫夏草重金属含量超标, 假冒伪劣产品充斥市场, 急需制定相应质量标准, 规范市场; 一些病虫害没有较好的防治方法, 主要还是以预防为主, 还需深入研究发生规律、综合防治技术等。针对种种问题, 应加大科研力度, 致力于解决生产实际问题, 并大力推广无公害冬虫夏草仿生态繁育技术, 稳定和提高冬虫夏草产量和质量, 推动冬虫夏草产业现代化发展。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2015:115.
- [2] Lu Z H, Shi P, He Y C, et al. Review on natural enemies

- and diseases in the artificial cultivation of Chinese caterpillar mushroom, *Ophiocordyceps sinensis* (Ascomycetes) [J]. *Int J Med Mushrooms*, 2015, 17(7):693-700.
- [3] Zhou X W, Li L J, Tian E W. Advances in research of the artificial cultivation of *Ophiocordyceps sinensis* in China [J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2014, 34(3):233-243.
- [4] 李如意, 宋厚盼, 魏艳霞, 等. 冬虫夏草药理作用的研究进展 [J]. *环球中医药*, 2016, 9(10):1284-1288.
- [5] 向丽. 冬虫夏草保护生物学研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2013.
- [6] Winkler D. Yartsa Gunbu (*Cordyceps sinensis*) and the fungal commodification of Tibet's rural economy [J]. *Econ Bot*, 2008, 62:291-305.
- [7] Xiang L, Li Y, Zhu Y, et al. Transcriptome analysis of the *Ophiocordyceps sinensis* fruiting body reveals putative genes involved in fruiting body development and cordycepin biosynthesis [J]. *Genomics*, 2014, 103(1):154-159.
- [8] 胡清秀, 廖超子, 王欣. 我国冬虫夏草及其资源保护、开发利用对策 [J]. *中国农业资源与区划*, 2005(5):47-51.
- [9] 鲁增辉, 陈仕江. 冬虫夏草产业化实践和思考 [J]. *环境昆虫学报*, 2016, 38(1):24-30.
- [10] 陶盛昌, 邱健健, 李全平, 等. 冬虫夏草培育及保鲜技术研究进展 [J]. *中药材*, 2018, 41(7):1772-1774.
- [11] 詹泽革, 李华, 黄亮, 等. 冬虫夏草繁育品与野生品红外指纹图谱一致性评价 [J]. *中国现代中药*, 2016, 18(3):312-315.
- [12] 刘杰, 李耀磊, 咎珂, 等. 冬虫夏草人工繁育品和野生冬虫夏草中5种重金属及有害元素含量的比较 [J]. *中国药事*, 2016, 30(9):912-918.
- [13] 李文佳, 董彩虹, 刘杏忠, 等. 冬虫夏草培植技术研究进展 [J]. *菌物学报*, 2016, 35(4):375-387.
- [14] 孟祥霄, 沈亮, 黄林芳, 等. 无公害中药材产地环境质量标准探讨 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2018, 24(23):1-7.
- [15] 董林林, 苏丽丽, 尉广飞, 等. 无公害中药材生产规程研究 [J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(15):1-15.
- [16] 王昊, 单宇, 孙志蓉. 冬虫夏草应用及市场现状分析 [J]. *现代中药研究与实践*, 2016, 30(6):83-86.
- [17] 王钢力, 金红宇, 韩小萍, 等. 冬虫夏草药材的质量研究及存在问题 [J]. *中草药*, 2008, 39(1):115-118.
- [18] 陈士林, 李西文, 孙成忠, 等. 中国药材产地生态适宜性区划 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017:768-769.
- [19] 丘雪红, 曹莉, 韩日畴. 冬虫夏草的研究进展、现存问题与研究展望 [J]. *环境昆虫学报*, 2016, 38(1):1-23.
- [20] Sung G H, Hywel-Jones N L, Sung J M, et al. Phylogenetic classification of *Cordyceps* and the Clavicipitaceous fungi [J]. *Stud Mycol*, 2007, 57:5-59.
- [21] 刘飞, 曾伟, 伍晓丽. 冬虫夏草菌种的种质资源研究 [J]. *重庆中草药研究*, 2004(1):53-57.
- [22] 冯儒亿, 吴丽娟. 全人工培育冬虫夏草产业化技术研究 [J]. *四川农业科技*, 2016(1):27-29.
- [23] 李文佳, 张宗耀, 李全平, 等. 冬虫夏草寄主昆虫及其饲养技术研究进展 [J]. *世界中医药*, 2017, 12(12):3142-3150.
- [24] 邱乙. 中国冬虫夏草寄主昆虫研究 [J]. *时珍国医国药*, 2015, 26(3):720-722.
- [25] 向丽, 陈士林, 代勇, 等. 冬虫夏草菌寄主小金蝠蛾人工饲养成虫生物学特性 [J]. *世界科学技术—中医药现代化*, 2012, 14(1):1172-1176.
- [26] 刘飞, 伍晓丽, 尹定华, 等. 冬虫夏草寄主昆虫的种类和分布研究概况 [J]. *重庆中草药研究*, 2006(1):47-50.
- [27] 青海省质量技术监督局. 实验室冬虫夏草真菌—中国被毛孢真菌分离技术规程: DB63/T 862—2009 [S]. 2009-12-07, 1-3.
- [28] 青海省质量技术监督局. 实验室冬虫夏草子囊孢子采集、净化、保存技术规程: DB63/T 669—2007 [S]. 2007-09-11, 1-2.
- [29] 张泽锦, 叶萌, 周祖基, 等. 冬虫夏草寄主昆虫饲养研究进展 [J]. *中草药*, 2009, 40(增刊):85-87.
- [30] 刘飞, 伍晓丽, 钱敏, 等. 冬虫夏草寄主幼虫不同产地主要食料的营养成分比较分析 [J]. *特产研究*, 2007, 29(4):52-55.
- [31] 青海省质量技术监督局. 实验室冬虫夏草蝙蝠蛾卵的孵化技术规程: DB63/T 864—2009 [S]. 2009-12-07, 1-2.
- [32] 青海省质量技术监督局. 实验室冬虫夏草寄主幼虫人工饲养技术规程: DB63/T 668—2007 [S]. 2007-09-11, 1-4.
- [33] 涂永勤, 朱华李, 张德利, 等. 不同产地冬虫夏草菌对寄主幼虫侵染力研究 [J]. *中国食用菌*, 2012, 31(5):32-34.
- [34] 雷桅, 彭青云, 张古忍, 等. 冬虫夏草菌在寄主钩蛾幼虫中的潜伏侵染过程研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(2):387-392.
- [35] 贺宗毅, 刘飞, 陈仕江, 等. 青藏高原特色资源冬虫夏草培育过程中的病虫害研究进展 [J]. *重庆中草药研究*, 2012(1):57-58.
- [36] 沈亮, 徐江, 陈士林, 等. 无公害中药材病虫害防治技术研究 [J]. *中国现代中药*, 2018, 20(9):1039-1048.
- [37] 陈炜, 杜光, 郭霞. 冬虫夏草重金属化学形态的研究 [J]. *中国医院药学杂志*, 2015, 35(22):2062-2064.
- [38] 曹晓刚, 王君, 李建民, 等. HPLC-HG-AFS 法分析西藏冬虫夏草中的砷形态化合物 [J]. *中成药*, 2015, 37(9):1985-1989.

(下转第1063页)

- [24] 张爱菊. 无公害党参栽培技术[J]. 基层农技推广, 2014, 2(9):64-65.
- [25] 田洪岭, 赵云生, 李占林, 等. 党参育苗栽培技术[J]. 农村实用科技信息, 2008(7):71.
- [26] 武志江, 郭凤霞, 李瑞杰, 等. 不同温度对素花党参种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(1):87-90, 96.
- [27] 陈恒冲, 马彬峡, 李景辉, 等. 药食两用植物-轮叶党参优质高产栽培技术[J]. 中国民族民间医药, 2012, 21(1):50, 61.
- [28] 康彦军. 党参标准化栽培技术[J]. 农业科技与信息, 2014(19):36-37.
- [29] 王刘安. 党参高产栽培技术研究[J]. 南方农机, 2018, 49(8):94.
- [30] 张立军, 王宏霞, 王国祥, 等. 甘肃党参搭架采种技术规程[J]. 甘肃农业科技, 2018(6):92-94.
- [31] 李彩霞. 党参高产栽培技术[J]. 农业科技与信息, 2016(16):67-68.
- [32] 郭兰萍, 张燕, 朱寿东, 等. 中药材规范化生产(GAP)10年:成果、问题与建议[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(07):1143-1151.
- [33] 李东坡, 武志杰. 化肥的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2008(5):1158-1165.
- [34] 龚成文, 赵欣楠, 冯守疆, 等. 配方施肥对党参生产特性的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11):130-136.
- [35] 冯守疆, 龚成文, 赵欣楠, 等. 甘肃道地中药材党参需肥规律研究[J]. 甘肃农业科技, 2010(10):11-12.
- [36] 郝新东. 临洮县党参规范化栽培技术[J]. 农业科技与信息, 2015(17):46-47.
- [37] 国家安全生产监督管理总局. 农药贮运、销售和使用的防毒规程:GB 12475—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [38] 中华人民共和国农业部. 农药登记管理术语:NY/T 1667.1—2008[S]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- [39] 何泽芳. 党参病虫害无公害防控措施[J]. 现代园艺, 2012(22):164.
- [40] 颜继红. 党参常见病虫害的危害症状及防治方法[J]. 现代农业科技, 2013(18):136-140.
- [41] 陈秀蓉. 甘肃省药用植物病害及其防治[M]. 北京:科学出版社, 2015:144.
- [42] 王瑞, 董林林, 徐江, 等. 基于病虫害综合防治的人参连作障碍消减策略[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(21):3890-3896.
- [43] 陈君, 徐常青, 乔海莉, 等. 我国中药材生产中农药使用现状与建议[J]. 中国现代中药, 2016, 18(3):263-270.
- [44] 赵国锋, 张丽萍, 武滨, 等. 山西党参规范化种植技术及SOP的制定[J]. 现代中药研究与实践, 2006, 20(6):13-16.
- [45] 甘国菊, 杨永康, 林先明, 等. 党参病虫害防治研究[J]. 中国现代中药, 2007, 9(5):33-34, 41.
- [46] 陈士林, 苏钢强, 邹健强, 等. 中国中药资源可持续发展体系构建[J]. 中国中药杂志, 2005, 30(15):1141-1146.
- [47] 杨朝晖. 科技创新推动中药材生产进入无公害时代[N]. 科技日报, 2018-06-13(03).
- [48] 沈奇, 张栋, 孙伟, 等. 药用植物DNA标记辅助育种(II)丰产紫苏新品种SNP辅助鉴定及育种研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(9):1668-1672.
- [49] 董林林, 陈中坚, 王勇, 等. 药用植物DNA标记辅助育种(一):三七抗病品种选育研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(1):56-62.
- [50] Wei G F, Wei F G, Yuan C, et al. Integrated chemical and transcriptomic analysis reveals the distribution of protopanaxadiol- and protopanaxatriol-Typesaponins in *Panax notoginseng* [J]. *Molecules*, 2018, 23:1773.
- [51] 陈士林, 董林林, 郭巧生, 等. 中药材无公害精细栽培体系研究[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(8):1517-1528.

(收稿日期 2018-09-10)

(上接第1056页)

- [39] 卢恒, 徐宁, 孟繁蕴. 冬虫夏草重金属的含量测定和健康风险评价[J]. 环境化学, 2017, 36(5):1003-1008.
- [40] 周利, 郝庆秀, 王升, 等. 微波消解 ICP-MS 法对冬虫夏草不同部位 5 种重金属元素的分布研究[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(15):2934-2938.
- [41] 林燕奎, 王丙涛, 颜治, 等. 总砷超标食用菌样品中砷形态分布研究[J]. 分析仪器, 2012(1):91-96.
- [42] 王永田, 田连营, 刘灿坤. 冬虫夏草质量及真伪的经验鉴别[J]. 中医临床研究, 2012, 4(12):24-25.
- [43] 李文佳, 汪小东, 艾中, 等. 冬虫夏草真伪鉴别方法研究进展[J]. 中国现代中药, 2014, 16(11):881-887, 920.
- [44] Xiang L, Song J, Xin T, et al. DNA barcoding the commercial Chinese caterpillar fungus [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2013, 347(2):156-162.

(收稿日期 2018-09-03)