

# 西藏冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫食性的稳定碳同位素证据

陈迪<sup>①</sup>, 袁建平<sup>①②</sup>, 徐世平<sup>③</sup>, 周小罡<sup>①</sup>, 张燕<sup>①</sup>, 徐小明<sup>④</sup>, 邹志文<sup>①</sup>, 张古忍<sup>①</sup>, 王江海<sup>①②\*</sup>

① 中山大学生命科学院, 有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广州 510275;

② 中山大学海洋学院, 广州 510006;

③ 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

④ 广州安能特电气设备有限公司研发中心, 广州 510635

\* 联系人, E-mail: wangjhai@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2008-11-27; 接受日期: 2009-04-24

国家科技支撑计划“十五”重点项目(批准号: 2007BAI32B05)资助

**摘要** 对青藏高原色季拉山冬虫夏草适生地的寄主蝠蛾幼虫及其主要近邻植物的嫩根和土壤腐殖物质组分进行了系统的稳定碳同位素组成研究, 发现在该地区存在两类食性不同的蝠蛾幼虫. 第一类以土壤腐殖物质为主要食物, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-22.6\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$ , 头部的  $\delta^{13}\text{C}$  值大于  $-23.4\text{‰}$ ; 第二类以植物嫩根为主要食物, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-24.6\text{‰} \sim -27.6\text{‰}$ , 头部的  $\delta^{13}\text{C}$  值小于  $-24.6\text{‰}$ . 突破了前人关于蝠蛾幼虫的食物来源仅限于植物嫩根的认识, 为规模化繁育蝠蛾幼虫时选取廉价优质食物和建造适合蝠蛾幼虫生长的人工适生地提供科学依据.

## 关键词

稳定碳同位素  
冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫  
腐殖物质  
青藏高原

冬虫夏草(*Cordyceps sinensis*)为鳞翅目蝙蝠蛾科蝠蛾属昆虫的幼虫被中国被毛孢(*Hirsutiella sinensis*)真菌寄生后形成的虫菌复合体<sup>[1,2]</sup>, 是在青藏高原及其周边高海拔地区繁衍的名贵药材<sup>[3]</sup>. 冬虫夏草因其无毒且有特殊功效而驰名中外. 现代药理学研究发现, 冬虫夏草具有抗肿瘤、调节免疫、降血糖、降血压、抗血管痉挛和促进睾丸激素的生物合成等多种生物活性<sup>[4,5]</sup>.

海外学者<sup>[6-8]</sup>虽对冬虫夏草进行了大量研究, 但仅限于冬虫夏草菌的培养、发酵工艺和活性成分研究, 而均未涉足冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的食性研究. 国

内学者<sup>[9-16]</sup>已采用传统食性分析法对冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的食性开展系统的研究, 确认该蝠蛾幼虫为杂食性昆虫, 并以蓼科和杜鹃科等多种植物的嫩根为食物, 特别喜食圆穗蓼(*Polygonum macrophyllum*)和珠芽蓼(*Polygonum viviparum*). 一些学者<sup>[17,18]</sup>在人工饲养蝠蛾幼虫时发现, 胡萝卜、甘薯和马铃薯也是其喜食的食物. 虽然朱斗锡等<sup>[15,16]</sup>推测腐殖质土或腐烂成泥的草根也是蝠蛾幼虫的食物来源, 但未提供确凿的证据.

稳定碳同位素示踪技术在生物圈物质循环研究中已得到广泛应用, 能提供动物长期的摄食信息并

具有客观反映动物物质和能量来源而无需作校正的优点<sup>[19-22]</sup>, 但迄今为止尚无人将该技术应用于冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的食性研究. 作者采用稳定碳同位素示踪技术研究了青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的食性, 首次发现以土壤腐殖物质为主要食物的蝠蛾幼虫. 本文为证实两类蝠蛾幼虫的存在及其食性进行溯源提供了稳定碳同位素证据.

## 1 材料及方法

### 1.1 采样

冬虫夏草寄主蝠蛾(*Hepialus*)幼虫(图 1 中照片)于 2007 年 6 月 20 日采自青藏高原色季拉山中山大学青藏高原特色资源科学工作站附近. 采样点地理坐标为: 经度 94°36'16"E, 纬度 29°36'20"N, 海拔为 4200 m. 采样点位于灌木丛中, 灌木主要为雪层杜鹃, 其根系可深达 45 cm. 蝠蛾幼虫采集点土壤从地表向下依次为枯枝落叶层(7~9 cm)、腐殖质层(23~33 cm)和母质层. 在该采样点 1 m<sup>2</sup> 范围内随机采到 13 条蝠蛾幼虫, 且都分布于该采样点的腐殖质层内. 在蝠蛾幼虫采集点同时采集腐殖质层的土壤及主要植物的嫩根样品.

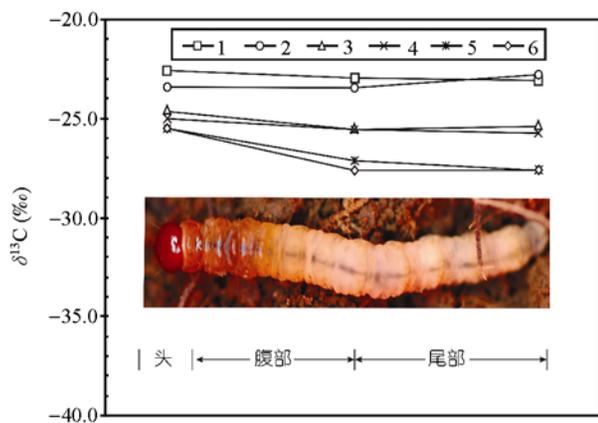


图 1 青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的形态及其各部分  $\delta^{13}\text{C}$  值的变异

### 1.2 样品准备

在 40℃ 烘箱中将蝠蛾幼虫和植物嫩根烘干; 干燥后的植物嫩根用玻璃碾钵研磨成 40 目的粉末; 干燥后的蝠蛾幼虫先分割成头部、腹部和尾部 3 段, 再将其分别用玻璃碾钵研磨成 40 目的粉末.

用如下实验步骤将土壤中的胡敏酸(Humic Acid, HA)、亲水性富里酸(Hydrophilic Fulvic Acid, Hil-FA)、疏水性富里酸(Hydrophobic Fulvic Acid, Hob-FA)和胡敏素(Humin, HM)分出:

(1) 称取 20 g 100 目的土壤粉末, 加入 200 mL 0.1 M NaOH 和 5 mL 3% NaCl 混合, 通入氮气并在室温下搅拌过夜.

(2) 将混合液以 10000×g 离心 15 min, 收集上清液(HA+FA); 难溶部分用浓 HCl 和 HF 除去黄铁矿和硅酸盐后, 得到 HM.

(3) 在(HA+FA)混合液中加入 4 M HCl 至 pH = 1.2, 过夜放置; 以 20000×g 离心 15 min, 沉淀部分即为 HA; 通过孔径为 0.22 μm 滤膜的滤液部分即为 FA.

(4) 向 FA 滤液中加入 100 mL 乙酸乙酯, 用分液漏斗将疏水层与亲水层分开, 得 FA 的疏水层和亲水层; 将疏水层旋转蒸干, 得 Hob-FA; 向亲水层加入 0.1 M AlCl<sub>3</sub> 和 1 M NaOH, 使 pH = 5 并过夜沉淀, 以 10000×g 离心 15 min, 沉淀部分即为 Hil-FA.

(5) 向 HA 中加入 0.3 M HF 和 0.1 M HClO<sub>4</sub> 混合液, 在室温下连续搅拌 5 h 以除去细小的矿物, 以 20000×g 离心 15 min, 得沉淀 HA; 用 0.1 M NaOH 将 HA 沉淀再溶解后透析, 使外周溶液的电导率小于 10 μS·cm<sup>-1</sup>, 最后将透析袋内溶液蒸干即得 HA.

(6) 将 HA, HM, Hil-FA 和 Hob-FA 干燥后碾磨成粉末, 供稳定碳同位素组成分析.

### 1.3 稳定碳同位素比值测定

根据样品中碳的含量, 称取适量蝠蛾幼虫、植物嫩根及从腐殖质层土壤中分离出的 HA, HM, Hil-FA 和 Hob-FA 的干粉末样品, 将其分别用干净的锡舟包裹并将待测样品编号后, 置于 Sartorius 4503 MICRO 自动进样盘中; 用全自动元素分析(型号: CE EA1112 C/N)-同位素比值质谱仪(型号: DELTA plusXL) (EA-IRMS)测定样品的  $\delta^{13}\text{C}$  值. 具体分析流程和仪器参数设置参见文献[23]. 稳定碳同位素比值的标准误差及标准品的测量值与固有值的偏差均小于 0.3‰.

## 2 研究结果

### 2.1 蝠蛾幼虫的稳定碳同位素组成及其变异特征

蝠蛾幼虫的稳定碳同位素比值分析结果列于表

1. 从表中看出, 蝠蛾幼虫的 $\delta^{13}\text{C}$  值变异明显, 变化范围为 $-22.6\text{‰}$ ~ $-27.6\text{‰}$ . 除样品 2 之外, 其他蝠蛾幼虫头部的 $\delta^{13}\text{C}$  均大于腹部和尾部的 $\delta^{13}\text{C}$ , 而腹部与尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值在分析误差范围内是基本一致的. 对于样品 2 的蝠蛾幼虫, 其头部与腹部的 $\delta^{13}\text{C}$  值相同, 但均略小于( $0.6\text{‰}$ )尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值. 将样品 1~2 的蝠蛾幼虫与样品 3~6 蝠蛾幼虫进行比较, 发现前者头部的 $\delta^{13}\text{C}$  值与腹部和尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值差异不大( $0\sim 0.6\text{‰}$ ), 而后者头部的 $\delta^{13}\text{C}$  值与腹部和尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值差异较明显且变化范围大( $0.6\text{‰}\sim 2.1\text{‰}$ ).

表 1 青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的稳定碳同位素比值

样号	类别	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			定量食物结构/%	
		头部	腹部	尾部	HA	嫩根
1	第一类	-22.6	-23.0	-23.1	78.26	21.74
2	第一类	-23.4	-23.4	-22.8	66.67	33.33
3	第二类	-24.6	-25.5	-25.4	49.28	50.72
4	第二类	-25.0	-25.6	-25.7	43.48	56.52
5	第二类	-25.5	-27.2	-27.6	36.23	63.77
6	第二类	-25.5	-27.6	-27.6	36.23	63.77

## 2.2 植物嫩根的稳定碳同位素组成

与蝠蛾幼虫采集点近邻的主要植物包括雪层杜鹃和珠芽蓼等 10 个科属(表 2), 其嫩根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值列于表 2. 从表中看出, 这些植物嫩根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-27.1\text{‰}$ ~ $-29.0\text{‰}$ , 平均值为 $-28.0\text{‰}$ , 表明它们均属于C3 植物<sup>[24]</sup>.

## 2.3 腐殖质层土壤中有机质组分的稳定碳同位素组成

从腐殖质层土壤中分离出的 HA, Hob-FA, Hil-FA 和 HM 及总有机质(TOM)的稳定碳同位素比值列于表 3. 从表中看出, TOM 的 $\delta^{13}\text{C}$  值为 $-24.6\text{‰}$ , 而土壤腐殖物质组分的 $\delta^{13}\text{C}$  值具有较宽的变化范围( $-21.1\text{‰}$ ~ $-27.5\text{‰}$ ), 其中 HA 的 $\delta^{13}\text{C}$  值最高, Hob-FA 的 $\delta^{13}\text{C}$  值最低; HA 和 HM 的 $\delta^{13}\text{C}$  值(分别为 $-21.1\text{‰}$ 和 $-23.5\text{‰}$ )与第一类蝠蛾幼虫的 $\delta^{13}\text{C}$  值( $-22.6\text{‰}$ ~ $-23.4\text{‰}$ )相近; Hil-FA 和 Hob-FA 的 $\delta^{13}\text{C}$  值(分别为 $-26.1\text{‰}$ 和 $-27.5\text{‰}$ )与第二类蝠蛾幼虫的 $\delta^{13}\text{C}$  值( $-24.6\text{‰}$ ~ $-27.6\text{‰}$ )相近, 而与第一类蝠蛾幼虫的 $\delta^{13}\text{C}$  值差异明显.

表 2 青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫适生地主要植物嫩根的稳定碳同位素比值

样号	植物类型	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
1	雪层杜鹃( <i>Rhododendron nivale</i> )	-27.1
2	缘毛紫菀( <i>Asrer souliei</i> )	-27.3
3	髯毛紫菀( <i>Aster barbellatus</i> )	-27.6
4	松潘凤毛菊( <i>Saussurea sungpanensis</i> )	-27.6
5	苍山卷柏( <i>Selaginella vardei</i> )	-27.8
6	珠芽蓼( <i>Polygonum viviparum</i> )	-27.8
7	长裂乌头( <i>Aconitum longilobum</i> )	-28.5
8	西藏草莓( <i>Fragaria nubicola</i> )	-28.7
9	花葶驴蹄草( <i>Caltha scaposa</i> )	-28.8
10	线果芥( <i>Conringia planisiliqua</i> )	-29.0

表 3 青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫适生地腐殖质层土壤中有机质组分的稳定碳同位素比值<sup>a)</sup>

有机质组分名称	HA	Hob-FA	Hil-FA	HM	TOM
有机质组分比例/%	1.07	0.17	42.03	56.73	100
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	-21.1	-27.5	-26.1	-23.5	-24.6

a) HA, 胡敏酸; Hob-FA, 疏水性富里酸; Hil-FA, 亲水性富里酸; HM, 胡敏素; TOM, 总有机质

## 3 讨论和结论

### 3.1 两类不同食性的蝠蛾幼虫存在的稳定碳同位素证据

根据新获得的蝠蛾幼虫、植物嫩根和土壤腐殖物质组分的稳定碳同位素比值数据(表 1~3), 我们可以作如下简单的数值计算及推理:

若蝠蛾幼虫仅以 $\delta^{13}\text{C}$  值为 $-27.1\text{‰}$ ~ $-29.0\text{‰}$ 的植物嫩根(表 2)为食物, 则其通过代谢作用可使自身的 $\delta^{13}\text{C}$  值增加  $0.4\text{‰}\sim 1.0\text{‰}$ <sup>[25,26]</sup>. 若按蝠蛾幼虫最大的代谢富集效应( $+1.0\text{‰}$ )计, 则以这样的植物嫩根为食物的蝠蛾幼虫, 其 $\delta^{13}\text{C}$  值为 $-26.1\text{‰}$ ~ $-28.0\text{‰}$ . 再考虑 $\pm 0.3\text{‰}$ 的分析误差, 则以这样的植物嫩根为食物的蝠蛾幼虫, 其 $\delta^{13}\text{C}$  值的变化范围为 $-25.8\text{‰}$ ~ $-28.3\text{‰}$ .

根据上述数值计算结果及蝠蛾幼虫 $\delta^{13}\text{C}$  值的变异特征(表 1 和图 1), 我们可以将蝠蛾幼虫细分为两类, 第一类蝠蛾幼虫(样品 1~2)的 $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围为 $-22.6\text{‰}$ ~ $-23.4\text{‰}$ , 头部的 $\delta^{13}\text{C}$  值大于 $-23.4\text{‰}$ , 且头部与腹部和尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值差异较小( $<0.6\text{‰}$ )(表 1 和图 1); 第二类蝠蛾幼虫(样品 3~6)的 $\delta^{13}\text{C}$  值为 $-24.6\text{‰}$ ~ $-27.6\text{‰}$ , 头部的 $\delta^{13}\text{C}$  值小于 $-24.6\text{‰}$ , 头部与腹部和尾部的 $\delta^{13}\text{C}$  值差异明显( $>0.6\text{‰}$ )(表 1 和图 1). 显然, 第一类蝠蛾幼虫必须摄入比这些植物嫩根具有更高

$\delta^{13}\text{C}$  值的食物. 根据表 3 的数据, 并结合蝠蛾幼虫的生活习性<sup>[11]</sup>, 我们可以确认第一类蝠蛾幼虫的主要食物为其生存环境周围土壤中的腐殖物质. 腐殖物质组分的稳定碳同位素测定结果(表 3)进一步表明, 就单一组分而言, HA 和 HM 都可作为第一类蝠蛾幼虫的食物. 若以多种土壤腐殖物质组分作为蝠蛾幼虫的食物, 则情形会更加复杂, 需要采用蝠蛾幼虫的饲养试验等其他方法进一步加以确认.

我们根据已获得的稳定碳同位素数据还可以进一步讨论蝠蛾幼虫的定量食物结构. 因土壤腐殖物质组分中仅有 HA 的  $\delta^{13}\text{C}$  值(-21.1‰)比蝠蛾幼虫最大的  $\delta^{13}\text{C}$  值(-22.6‰)高, 故在蝠蛾幼虫定量食物结构计算时 HA 是  $\delta^{13}\text{C}$  值最高的端元, 而植物嫩根是  $\delta^{13}\text{C}$  值最低的端元. 若蝠蛾幼虫的稳定碳同位素比值以表 1 中头部的  $\delta^{13}\text{C}$  值为准(这样可以消除因蝠蛾幼虫腹部和尾部可能存在食物残留和粪便而影响其  $\delta^{13}\text{C}$  值), 植物嫩根的  $\delta^{13}\text{C}$  值以 10 种植物嫩根  $\delta^{13}\text{C}$  值的算术平均值(-28.0‰)计, 蝠蛾幼虫除了吃植物嫩根之外, 还以土壤中的 HA 为食物( $\delta^{13}\text{C} = -21.1\text{‰}$ ), 则蝠蛾幼虫的定量食物结构如表 1 所示. 显见, 第一类蝠蛾幼虫至少食土壤腐殖物质组分 HA 的量高达 66.67%~78.26%, 而第二类蝠蛾幼虫至少食土壤腐殖物质组分 HA 的量为 36.23%~49.28%.

### 3.2 新发现与我国冬虫夏草资源的可持续利用

近年来, 随着生活水平和健康意识的提高, 人们对冬虫夏草的需求持续扩大, 价格也不断攀升<sup>[1]</sup>. 为了缓解冬虫夏草资源利用与生态环境之间的矛盾, 人们试图通过人工干预方法, 提高冬虫夏草适生地蝠蛾幼虫的密度和蝠蛾幼虫感染冬虫夏草菌的感染

率, 达到使冬虫夏草增产的目的. 显然, 要实现上述科学目标, 必须解决“低成本大规模繁殖蝠蛾幼虫”这个难题. 以腐殖物质为主要食物的冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的发现, 突破了前人将其食物来源仅限于植物嫩根的认识<sup>[9-16]</sup>, 为探寻一种既能为蝠蛾幼虫提供廉价优质的食物, 而又不产生新的微观生态学问题的方法提供了一条全新的思路, 即此类可作为蝠蛾幼虫食物的腐殖物质能在低海拔地区快速规模化生产并以类似“肥料”的形式添加于高海拔冬虫夏草适生地土壤中进行蝠蛾幼虫饲养, 为规模化繁育蝠蛾幼虫时选取廉价优质食物和建造适合蝠蛾幼虫生长的人工适生地提供科学依据, 为解决冬虫夏草资源的可持续利用与青藏高原脆弱生态环境之间的矛盾提供技术支撑.

### 3.3 结论

(1) 青藏高原色季拉山冬虫夏草适生地存在两类食性明显不同的蝠蛾幼虫, 一是以土壤腐殖物质为主要食物, 它的稳定碳同位素特征为:  $\delta^{13}\text{C} = -22.6\text{‰} \sim -23.4\text{‰}$ , 头部的  $\delta^{13}\text{C}$  值大于  $-23.4\text{‰}$ , 头部与腹部和尾部  $\delta^{13}\text{C}$  的差值小于  $0.6\text{‰}$ ; 二是以植物嫩根为主要食物, 它的稳定碳同位素特征为:  $\delta^{13}\text{C} = -24.6\text{‰} \sim -27.6\text{‰}$ , 头部的  $\delta^{13}\text{C}$  值小于  $-24.6\text{‰}$ , 头部与腹部和尾部  $\delta^{13}\text{C}$  的差值大于  $0.6\text{‰}$ .

(2) 以本文新获得的稳定碳同位素数据为基础, 对青藏高原色季拉山冬虫夏草寄主蝠蛾幼虫的食物结构进行了定量数值模拟, 结果表明第一类和第二类蝠蛾幼虫除以植物嫩根为食物外, 均还以土壤腐殖物质组分(HA)为食物, 且 HA 占它们食物总量的比例分别为 66.67%~78.26% 和 36.23%~49.28%.

致谢 感谢两位审稿专家提出的宝贵意见.

### 参考文献

- 1 古德祥, 张古忍, 王江海, 等. 冬虫夏草研究的回顾与展望. 中国食品学报, 2006, 6(2): 137—141
- 2 张古忍, 古德祥, 刘昕. 中国蝠蛾属一新种(鳞翅目, 蝙蝠蛾科). 昆虫分类学报, 2007, 32(2): 473—476
- 3 Buenz E J, Bauer B A, Osmundson T W, et al. The traditional Chinese medicine *Cordyceps sinensis* and its effects on apoptotic homeostasis. J Ethnopharmacol, 2005, 96: 19—29[DOI]
- 4 Isaka M, Kittakoop P, Kirtikara K, et al. Bioactive substances from insect pathogenic fungi. Acc Chem Res, 2005, 38: 813—823[DOI]
- 5 Zhang M, Cui S W, Cheung P C K, et al. Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on their isolation process, structural

- characteristics and antitumor activity. *Trends Food Sci Tech*, 2007, 18: 4—19[DOI]
- 6 Bok J W, Lermer L, Chilton J, et al. Antitumor sterols from the mycelia of *Cordyceps sinensis*. *Phytochemistry*, 1999, 51: 891—898[DOI]
- 7 Ahn Y J, Park S J, Lee S G, et al. Cordycepin: selective growth inhibitor derived from liquid culture of *Cordyceps militaris* against *Clostridium* spp. *J Agric Food Chem*, 2000, 48: 2744—2748[DOI]
- 8 Li C, Li Z, Fan M, et al. The composition of *Hirsutella sinensis*, anamorph of *Cordyceps sinensis*. *J Food Compos Anal*, 2006, 19: 800—805[DOI]
- 9 黄天福, 傅善全, 罗庆明. 康定虫草蝙蝠蛾幼虫食性试验. *四川动物*, 1989, 8(3): 8—10
- 10 陈仕江, 黄天福. 贡嘎蝠蛾生长发育的初步研究. *中药材*, 1995, 18(4): 171—173
- 11 杨大荣, 李朝达, 舒畅, 等. 中国蝠蛾昆虫的种类和地理分布研究. *昆虫学报*, 1996, 39(4): 413—422
- 12 尹定华, 陈仕江, 李黎, 等. 西藏冬虫夏草寄主蝠蛾生物学特性的研究. *特产研究*, 2004, (2): 1—5
- 13 刘飞, 伍晓丽, 尹定华, 等. 冬虫夏草寄主昆虫的生物学研究概况. *重庆中草药研究*, 2005, (1): 45—52
- 14 李玉玲, 徐成体, 何力剑. 冬虫夏草寄主玉树蝠蛾幼虫的生物学. *昆虫知识*, 2007, 44(2): 285—288
- 15 朱斗锡, 何荣华, 王洋, 等. 我国青藏高原蝙蝠蛾昆虫生态习性研究. *中国食用菌*, 2007, 26(2): 10—11
- 16 朱斗锡, 何荣华. 西藏冬虫夏草资源可持续利用的关系与对策. *中国食用菌*, 2007, 26(6): 18—20
- 17 王宏生. 虫草蝠蛾五龄幼虫人工饲料的初步研究. *甘肃畜牧兽医*, 2001, 31(5): 15—16
- 18 徐海峰. 青海拉脊蝠蛾的生物学特性观察研究. *四川草原*, 2004, (9): 4—5
- 19 Chamberlain P M, Bull L D, Black H J, et al. Lipid content and carbon assimilation in *Collembola*: implications for the use of compound specific carbon isotope analysis in animal dietary studies. *Oecologia*, 2004, 139: 325—335[DOI]
- 20 Gaye-Siessegger J, Focken U, Muetzel S, et al. Feeding level and individual metabolic rate affect  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in carp: implications for food web studies. *Oecologia*, 2004, 138: 175—183[DOI]
- 21 Ruess L, Tiunov A, Haubert D, et al. Carbon stable isotope fractionation and trophic transfer of fatty acids in fungal based soil food chains. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37: 945—953[DOI]
- 22 Galimov E M. Isotope organic geochemistry. *Org Geochem*, 2006, 37: 1200—1262[DOI]
- 23 Liu X, Xu S P, Wang J H, et al. Characterization of ganoderma spore lipid by stable carbon isotope analysis: implications for authentication. *Anal Bioanal Chem*, 2007, 388: 723—731[DOI]
- 24 Benson S, Lennard C, Maynard P, et al. Forensic applications of isotope ratio mass spectrometry: a review. *Foren Sci Int*, 2006, 157: 1—22[DOI]
- 25 Deniro M J, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta*, 1978, 42: 495—506[DOI]
- 26 McCutchan Jr J H, Lewis Jr W M, Kendall C, et al. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 2003, 102: 378—390[DOI]