

# 红瘰疣螈的体温调节

何丽娟<sup>①</sup> 敬 凯<sup>①</sup> 王政昆<sup>①\*</sup> 柳鹏飞<sup>①</sup> 张 麟<sup>①</sup> 朱万龙<sup>①</sup> 董文鸽<sup>②</sup>

(<sup>①</sup> 云南师范大学生命科学学院 生物能源持续开发利用教育部工程研究中心

云南省能源与环境生物技术重点实验室 昆明 650092; <sup>②</sup> 大理学院病原与媒介生物研究所 云南 大理 671000)

**摘要:**红瘰疣螈 (*Tylototriton shanjing*) 为我国 II 级重点保护野生动物。本实验测定了在不同环境温度条件下红瘰疣螈体温及代谢率变化。结果表明,在 10~35℃ 环境温度范围内红瘰疣螈体温 ( $T_b$ ) 与环境温度 ( $T_a$ ) 呈正相关,其直线回归方程为:  $T_b = 3.99 + 0.86T_a$  ( $R^2 = 0.99, P < 0.01$ ); 其代谢率 ( $MR$ ) 在 15~30℃ 的环境温度范围内随环境温度的升高而升高,在 35℃ 时,其代谢率由于体温过高而急剧降低;在 15~35℃ 之间的 6 个温度条件下雄性代谢率的回归方程为:  $MR_1 = 0.3741 - 0.3551T_a + 0.1139T_a^2 - 0.0105T_a^3$  ( $R^2 = 0.47, P < 0.01, df_1 = 3, df_2 = 46$ ); 雌性代谢率的回归方程为:  $MR_2 = 0.4788 - 0.4203T_a + 0.1304T_a^2 - 0.0118T_a^3$  ( $R^2 = 0.40, P < 0.01, df_1 = 3, df_2 = 46$ )。不同于内热源动物的代谢特征,红瘰疣螈的体温调节表现出外热源动物的特点:其体温受环境影响较大,体温生理调节能力较弱。

**关键词:**红瘰疣螈;环境温度;体温;耗氧量

中图分类号:Q955 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2010)06-133-08

## Thermoregulation in the Red Knobby Newt, *Tylototriton shanjing*

HE Li-Juan<sup>①</sup> JING Kai<sup>①</sup> WANG Zheng-Kun<sup>①\*</sup> LIU Peng-Fei<sup>①</sup>

ZHANG Lin<sup>①</sup> ZHU Wan-Long<sup>①</sup> DONG Wen-Ge<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>School of Life Science of Yunnan Normal University, Engineering Research Center of Sustainable Development and Utilization of Biomass Energy Ministry of Education, Key Laboratory of Yunnan Province for Biomass Energy and Environment Biotechnology, Kunming 650092; <sup>②</sup>Institute of Pathogens and Vectors, Dali University, Yunnan Dali 671000, China)

**Abstract:** Red knobby newt (*Tylototriton shanjing*) is listed as category II of national key protected animals. Body temperatures and metabolic rates of the Red Knobby Newt were measured at different ambient temperatures. Results showed that there was a significantly positive correlation between body temperature ( $T_b$ ) and ambient temperature ( $T_a$ ), and the linear regression equation is  $T_b = 3.99 + 0.86T_a$  ( $R^2 = 0.99, P < 0.01$ ); within the range of ambient temperatures from 15℃ to 30℃, metabolic rate increased with ambient temperature; Metabolic rate decreased dramatically at 35℃ or higher; Within the range of ambient temperatures from 15℃ to 35℃, regression equations for males and females were  $MR_1 = 0.3741 - 0.3551T_a + 0.1139T_a^2 - 0.0105T_a^3$  ( $R^2 = 0.47, P < 0.01, df_1 = 3, df_2 = 46$ ) and  $MR_2 = 0.4788 - 0.4203T_a + 0.1304T_a^2 - 0.0118T_a^3$  ( $R^2 = 0.40, P < 0.01, df_1 = 3, df_2 = 46$ ), respectively. The metabolic characteristics of red knobby newts were different from that of the endothermic animals. Their thermoregulation showed that the ambient temperature

基金项目 云南省科技强省重点项目 (No. 2007C0005Z1), 云南省应用基础研究计划项目 (No. 2006C0029M), 云南省教育厅重大项目 (No. ZD2009007), 云南省教育厅科学研究基金项目 (No. 06Y118B);

\* 通讯作者, E-mail: wzk\_930@yahoo.com.cn.

第一作者介绍 何丽娟,女,硕士研究生;研究方向:动物生理生态学;E-mail: helijuan\_8611@yeah.net.

收稿日期:2010-04-06, 修回日期:2010-07-07

has significantly influenced body temperature, and the capability of the body temperature regulation is feebleness, which are typical of ectotherms.

**Key words:** *Tylototriton shanjing*; Ambient temperature; Body temperature; Metabolic rate

两栖动物体温的不稳定性和调节机制的多样性以及复杂性,决定了两栖动物与其他内温动物在生长发育、代谢机制及生存对策等方面存在一定区别,这也正是两栖类在近年来得到众多生理生态学者关注和最具吸引力的原因<sup>[1]</sup>。

红瘰疣螈 (*Tylototriton shanjing*) 为有尾目蝾螈科动物<sup>[2]</sup>,依据云南景东的标本命名<sup>[3]</sup>,为国家 II 级重点保护野生动物。疣螈属动物是蝾螈科中较为原始的类群。红瘰疣螈分布于云南怒江、澜沧江和元江流域<sup>[4]</sup>。由于自然栖息地被破坏、捕猎等因素,红瘰疣螈的种群数量急剧下降,因此加强对该物种的研究及保护刻不容缓。

作为有尾目两栖类动物,红瘰疣螈的形态结构及生活史反映了它们从水生生活到陆生生活的过渡特性,在脊椎动物进化史上,代表了一个重要的发展阶段<sup>[5]</sup>,其在进化上的重要地位决定了在各个方面都具有重要的科学研究价值<sup>[6]</sup>。目前对于红瘰疣螈已有的研究主要涉及分类<sup>[7]</sup>、早期胚胎发育<sup>[8]</sup>、产卵过程<sup>[9]</sup>和繁殖生物学<sup>[10]</sup>等方面,但对其生理生态学方面,特别是有关体温调节机制的研究极少。而外温动物生长、发育、繁殖、行为和分布都易受环境温度的影响,有关外温动物体温调节机制的研究多是在爬行动物上进行的,主要涉及环境温度变化与其热代谢<sup>[11]</sup>、体温调节<sup>[12-13]</sup>、环境选择<sup>[14-15]</sup>等方面关系的研究,两栖动物体温调节和代谢的相关研究非常有限,且多集中于无尾目动物<sup>[16-17]</sup>,对有尾目动物的相关研究更为少见<sup>[18-19]</sup>,而两栖动物的生活习性和生存环境与爬行动物有很大不同。因此,探讨两栖动物代谢特征和体温调节与其生活史、进化途径及其生物多样性与环境之间相适应等方面的关系,及与其他外温动物的差异,有助于揭示外温动物代谢及体温调节机制。

本文以有尾目疣螈属红瘰疣螈为研究对象,测定在不同环境温度条件下其体温调节情况以及代谢率的变化,以探讨不同环境温度条件下红瘰疣螈的体温调节机理。

## 1 材料与方法

**1.1 实验动物** 红瘰疣螈生活于云南的西部、南部和中部海拔 1 000 ~ 2 000 m 左右的山区,以蚯蚓和昆虫等为食。夏秋季节活动在山区及水域附近,雨后大量出现在山区的小路旁、村舍附近<sup>[20]</sup>。

实验动物于 2009 年 5 月初捕自云南省玉溪市新平县哀牢山山麓的小溪及梯田中(东经 101.54°,北纬 24.01°附近,海拔 1 900 m 左右),共捕获红瘰疣螈 28 只(12 ♀,16 ♂)。该地区 5 月份 16:00 时平均气温 21.0°C,最高气温 27.5°C,最低气温 14.0°C,平均相对湿度 72%;周围灌木丛茂密,静水水域丰富,水田、菜地、水沟等环境静水存水量稳定。由于 5 ~ 8 月份为疣螈的繁殖季节<sup>[21]</sup>,本次实验所用红瘰疣螈均为繁殖期成年个体,实验后放归原捕获地。

实验动物捕回后于云南师范大学生命科学学院(昆明)实验室饲养。每 3 对(3 ♀:3 ♂)红瘰疣螈置于一透明塑料饲养容器(35 cm × 25 cm × 22 cm)中饲养,容器底部铺呈楔型约 0 ~ 3 cm 厚的泥土,注入约 2 cm 深的水,泥土上附着数株活的杂草,最上层铺以干燥的梧桐树叶(便于红瘰疣螈藏身及遮阴),这些内容物约占饲养容器总体积的一半。每三日喂以面包虫或水蚯蚓,每天均用喷壶浇以适当水,白天可将饲养容器移到室外,天阴或下雨时移出时间可较长(甚至整天),天气炎热及光照强烈时移出时间不可过长(1 h 以内)。动物适应两周后,随机选取红瘰疣螈 20 只(10 ♀:10 ♂)进行正式实验。

**1.2 环境温度 ( $T_a$ ) 对红瘰疣螈体温 ( $T_b$ ) 的影**

响 环境温度用上海博迅医疗设备厂生产的 SPX-300 型人工气候箱控制(温度波动  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) 红瘰疣螈体温用北京师范大学司南仪器厂生产的数字式体温计插入直肠约 1 cm 测定。

实验时,将红瘰疣螈装于盛有少量水的 500 ml 锥形瓶中。首先置于室温 ( $23 \pm 2$ )  $^\circ\text{C}$  适应 20 min,然后分别置于 6 个环境温度梯度  $10^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$  ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) 中适应 1 h,分别测定实验前后红瘰疣螈的体温,以实验后的体温为其在该环境温度条件下的体温,每次测温探头在泄殖腔内静置约 30 s 左右读数。

**1.3 代谢率(MR)测定** 使用开放式呼吸仪(澳大利亚 AD ML870)测定动物的静止代谢率,代谢率的计算方法见 Hill<sup>[22]</sup>,呼吸室容积为 65 ml,进入呼吸室的气体流量为 30 ml/min,温度人工气候箱(上海博迅医疗设备厂 SPX-300)控制(温度波动  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )。环境温度分别控制在 ( $15 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$ 、( $20 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$ 、( $25 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$ 、

( $30 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$  以及 ( $35 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$  条件下,实验动物在控制温度下适应 30 min 后依次对其进行测定。

**1.4 统计分析** 采用 SPSS for Windows 16.0 软件包进行统计分析,头体长、尾长、体重采用独立样本 *t*-检验(independent *t*-text);不同环境温度条件下体温、种内雌雄个体代谢率差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA); $T_b$ 、MR 对  $T_a$  做回归分析(regression),其中  $T_b$  使用线性分析(linear regression),MR 使用曲线估计拟合(curve estimation)。 $P < 0.05$  为差异显著, $P < 0.01$  为差异极显著,结果均以平均值  $\pm$  标准误(Mean  $\pm$  SE)表示。

## 2 结果

**2.1 环境温度与体温变化** 红瘰疣螈雌雄头体长( $t = 6.91$ ,  $P < 0.01$ )、尾长( $t = 3.30$ ,  $P < 0.01$ )、体重( $t = 9.66$ ,  $P < 0.01$ )均存在显著差异(independent *t*-text)(表 1)。

表 1 红瘰疣螈的基本参数

Table 1 Measurement of *Tylostrotion shanjing*

	样本数( <i>n</i> ) Samples size	头体长(mm) Snout-vent length (SVL)	尾长(mm) Tail length(TL)	体重(g) Body mass (BM)
雄性 Male	10	76.4 $\pm$ 1.4	64.4 $\pm$ 3.1	12.3 $\pm$ 0.7
雌性 Female	10	93.8 $\pm$ 2.1	77.1 $\pm$ 2.3	24.6 $\pm$ 1.1

在  $10 \sim 35^\circ\text{C}$  环境温度范围内红瘰疣螈体温( $T_b$ )与环境温度( $T_a$ )之间呈正相关,各温度点间差异极显著(One-Way ANOVA,  $F_{5,114} = 2011.7$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 20$ ),其体温与环境温度的直线回归方程为  $T_b = 3.99 + 0.86 T_a$  ( $R^2 = 0.99$ ,  $P < 0.01$ );当  $T_b = T_a$  时,体温与环境热交换的平衡点即同温区在  $28.5^\circ\text{C}$  左右,红瘰疣螈处在“平衡点”以上环境时, $T_b < T_a$ ,其体温虽然随环境温度升高而升高,但稍低于环境温度;当处在“平衡点”以下时, $T_b > T_a$ ,其体温随着环境温度的下降而下降,但逐渐高于环境温度(图 1)。

**2.2 环境温度与代谢率变化** 在  $15 \sim 30^\circ\text{C}$  的环境温度范围内,雌雄红瘰疣螈代谢率随环境温度的升高而上升;在  $30^\circ\text{C}$  时代谢率最高,显著高于其他环境温度条件下的代谢率;但在

$35^\circ\text{C}$  时,其代谢率急剧下降;在各个温度点上雌性红瘰疣螈的代谢率均低于雄性红瘰疣螈的代谢率,在  $30^\circ\text{C}$  时雌雄红瘰疣螈的代谢率差异极显著( $P < 0.01$ ),其余温度点差异不显著( $P > 0.05$ )(表 2)。

对红瘰疣螈雌雄个体在不同温度条件下的代谢率(MR)(表 2)与环境温度( $T_a$ )用回归分析中的曲线估计拟合处理,红瘰疣螈雌雄 MR 与  $T_a$  拟合模型符合一元三次的数学模型。回归方程分别为:雄性  $MR_1 = 0.3741 - 0.3551T_a + 0.1139T_a^2 - 0.0105T_a^3$  ( $R^2 = 0.47$ ,  $P < 0.01$ ,  $df_1 = 3$ ,  $df_2 = 46$ );雌性  $MR_2 = 0.4788 - 0.4203T_a + 0.1304T_a^2 - 0.0118T_a^3$  ( $R^2 = 0.40$ ,  $P < 0.01$ ,  $df_1 = 3$ ,  $df_2 = 46$ )(图 2)。

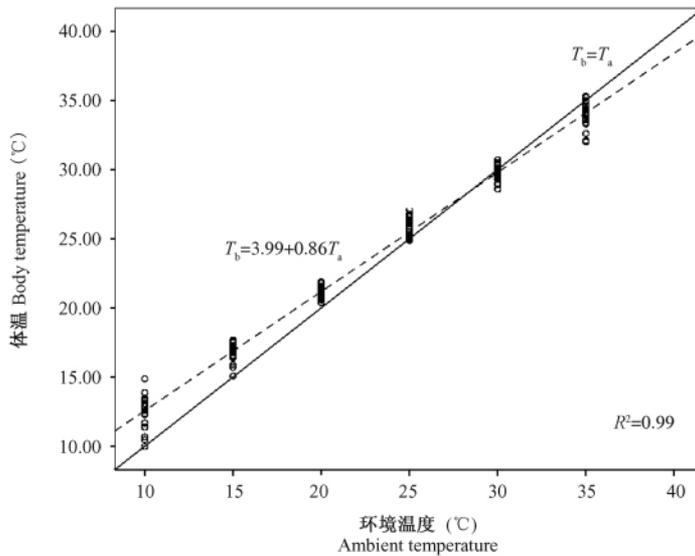


图 1 环境温度与红瘰疣螈体温之间的关系

Fig. 1 The relationship between ambient temperature and body temperature of *Tylotriton shanjing*

表 2 环境温度与红瘰疣螈的代谢率

Table 2 Metabolic rates of *Tylotriton shanjing* at different ambient temperatures

环境温度 Ambient temperature (±1°C)	样本数 Sample size (n)	代谢率 [ml O <sub>2</sub> / (g · h)]		F	P
		雄性 Male	雌性 Female		
15	20	0.105 ± 0.009	0.105 ± 0.010	0.018	0.968
20	20	0.176 ± 0.032	0.115 ± 0.017	2.742	0.110
25	20	0.281 ± 0.040	0.205 ± 0.031	0.948	0.150
30	20	0.463 ± 0.054	0.275 ± 0.106	0.458	0.008
35	20	0.226 ± 0.028	0.176 ± 0.019	1.066	0.157

### 3 讨论

3.1 环境温度与体温变化 外温动物体温调节机制与哺乳动物具有较大差异,热环境可显著影响外温动物的体温,进而影响其生理和生化过程<sup>[23-26]</sup>。在自然条件下,外温动物的活动、觅食、避敌、繁殖等生命活动在很大程度上依赖于热环境,极端环境温度对外温动物有害,甚至直接导致死亡,而在温和至相对较高温度范围内,可使动物的行为和生理功能得到充分表达<sup>[27-29]</sup>。

变温动物的体温随环境温度的升降而有平行相应的变化<sup>[11]</sup>。在 10~35°C 范围条件下,红瘰疣螈的体温随环境温度的升高而升高(图

1),表明红瘰疣螈维持体温的能量主要来自外界环境的辐射热能,易受环境温度变化的影响,这种现象与其他变温动物相似<sup>[11-19]</sup>。

变温动物的体温回归线与等温线( $T_b = T_a$ )相交点为体温与环境热交换的平衡点<sup>[11]</sup>,红瘰疣螈热交换的平衡点为 28.5°C,表明此时的体热与环境热能交换处于平衡状态。变温动物体温与环境温度变化的直线斜率,反映了变温动物的体温虽然是被动地随着环境温度的变化而变化,但变温动物自身仍具有一定的调节能力,调节能力越强,其直线斜率越接近于零;调节能力越弱,其直线斜率越接近于 1<sup>[18]</sup>。红瘰疣螈在环境温度为 28.5°C 左右时,其直线斜率更接近于 1,说明在此温度条件下红瘰疣螈

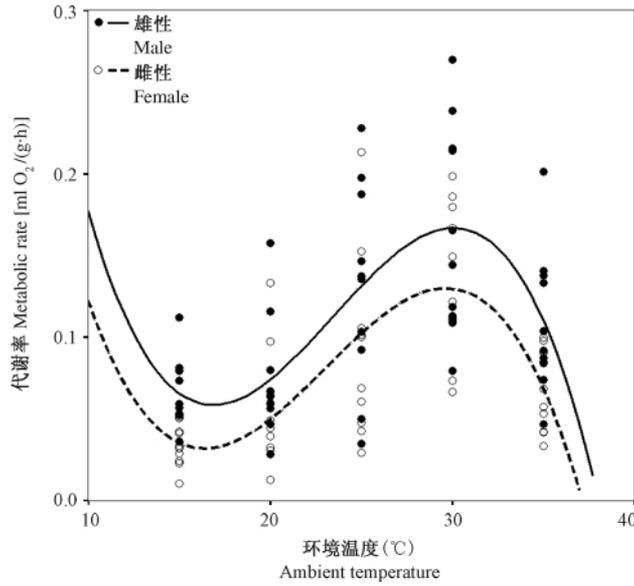


图 2 环境温度与红瘰疣螈代谢率之间的关系

Fig. 2 The relationship between ambient temperature and metabolic rate of *Tylototriton shanjing*

的体温调节能力最弱。

在野外观察中,一般阴雨天时红瘰疣螈的活动较为活跃,在田间、小溪或水沟中都比较容易发现红瘰疣螈,但当环境温度低于 14℃ 时,即便阴雨天也很难发现红瘰疣螈的踪迹。我们的实验发现当环境温度低于 23℃ 时,红瘰疣螈的体温随环境温度的下降而下降,红瘰疣螈在环境温度 14℃ 时的体温已经很低,而环境温度低于 14℃ 时,红瘰疣螈体温下降幅度较大,这可能是影响其活动性的一个关键因素。这说明红瘰疣螈的活动不仅受环境中空气湿度的影响,可能还与环境温度有着密切的关系。

红瘰疣螈体温与环境温度变化的回归直线方程斜率为 0.86,表示环境温度每增加 1℃,红瘰疣螈的体温就升高 0.86℃。由此说明红瘰疣螈的体温主要依赖于外界环境的辐射热能来维持。而其他变温动物,如东亚钳蝎 (*Buthus martensii*)、无蹼壁虎 (*Gekko swinhonis*)、爪鲵 (*Onychodactylus ficheri*) 的回归直线斜率分别为 0.642<sup>[12]</sup>、0.835 9<sup>[13]</sup> 和 0.952<sup>[18]</sup>,可见,红瘰疣螈的回归直线斜率都接近于这几类变温动物;略低于同为有尾目的爪鲵,主要由于红瘰疣螈与爪鲵相比个体较小。相比于无尾目的两栖

动物,在温度 5 ~ 30℃ 时,东北林蛙 (*Rana dybowskii*) 和黑龙江林蛙 (*R. amurensis*) 的回归直线斜率为 0.958 和 1.086<sup>[17]</sup>,红瘰疣螈的回归直线斜率低于这两种北方物种,表明红瘰疣螈相比于无尾目的东北林蛙和黑龙江林蛙体温调节能力较强,这主要由于它们所处环境不同,东北林蛙和黑龙江林蛙的生活环境温度更低,它们在较低温度 (5 ~ 15℃) 下具有较高的体温调节能力,这与红瘰疣螈对其生境的适应性有关。

3.2 环境温度与代谢率 代谢率为动物能量消耗的重要参数,与动物的生活史特征、生态特征和行为特征密切相关<sup>[30]</sup>。这一点不仅适于恒温动物,也适于变温动物。红瘰疣螈的代谢与东亚钳蝎、爪鲵等变温动物的代谢相似<sup>[12-13, 17-18]</sup>,暴露在最低温度等级环境中,其代谢水平最低;暴露在最高温度等级环境中,代谢水平也最高。这与恒温动物或内热源动物不同,恒温动物暴露在低温等级中,代谢水平反而最高;暴露在中性温度区时,其代谢水平才低<sup>[31-32]</sup>。

对环境温度、体温和代谢率进行相关性分析,得出它们三者间存在显著相关关系 ( $P < 0.01$ )。在 30℃ 环境中红瘰疣螈的代谢率最

高;在环境温度低于 15℃ 时其代谢率很低,已很难测定出来;而在 15 ~ 25℃ 的温度范围内其代谢率都较为稳定,这与其生活环境相适应;而当环境温度达到 35℃ 时,其代谢率急剧下降,其体温也显著增加,且在呼吸室内烦躁不安,表明此温度条件下红瘰疣螈已极度不适应。

有尾类的肺一般呈简单的细长囊形、壁薄、内面光滑或仅基部具肺泡,其气管壁无软骨的支持,也未进一步分化出支气管<sup>[5]</sup>;因而两栖动物皮肤对维持两栖动物自身生存和适应栖息地的多样化起着重要作用,能为其生存提供必须的功能:呼吸作用、调节水分、抵御捕食、抗微生物入侵、排泄、生殖等<sup>[33]</sup>;两栖动物在高温环境中皮肤腺分泌大量黏液<sup>[34-36]</sup>,湿润体表,这可能是因高温而使皮肤水分耗竭时引起的,以达到皮肤蒸发散热的作用。在高温条件下,虽然能通过蒸发而发散一部分热量,但是,由于皮

肤分泌过量的黏液,使皮肤的呼吸作用受到伤害,导致组织缺氧<sup>[36]</sup>;另外,由于体温过高,体内酶活性、原生质粘滞性、膜流动性、血液循环速度及代谢产物的排泄等均受到影响,致使红瘰疣螈代谢率急剧下降。

红瘰疣螈生境的环境温度很少超过 30℃,环境温度较高时,红瘰疣螈都会钻入石缝或其他隐蔽所里,防止暴露在温度过高的环境中。在环境温度 30℃ 时,红瘰疣螈虽然具有最高的代谢率,但这也可能并非是红瘰疣螈的最适生活环境温度,因为此时红瘰疣螈在呼吸室内也烦躁不安,且分泌大量黏液,而正常环境中的红瘰疣螈一般行动缓慢,体表分泌物也较少;在环境温度高于 28℃ 时,在野外也很难发现红瘰疣螈的踪迹,此时红瘰疣螈可能潜入水中或隐蔽于其他阴凉的地方,防止体温升高,因而很少进行活动。

表 3 环境温度与 4 种两栖动物的代谢率

Table 3 Metabolic rates of four amphibians at different ambient temperatures

环境温度 Ambient temperature (± 1℃)	代谢率 Metabolic rate [ml O <sub>2</sub> / (g · h)]							
	红瘰疣螈 <i>Tylotriton shanjing</i>		东北林蛙 <sup>[23]</sup> <i>Rana dybowskii</i>		黑龙江林蛙 <sup>[23]</sup> <i>Rana amurensis</i>		爪鲵 <sup>[22]</sup> <i>Onychodactylus fischeri</i>	
	雄性 Male	雌性 Female	雄性 Male	雌性 Female	雄性 Male	雌性 Female		
5	—	—	191.34	128.97	257.31	225.26		—
6	—	—	—	—	—	—		0.23
10	—	—	227.02	151.53	318.24	282.34		0.26
15	0.11	0.11	268.90	188.89	406.54	369.95		0.27
20	0.18	0.2	398.00	259.01	547.88	508.55		0.32
25	0.28	0.21	530.10	367.80	789.56	681.20		0.47
30	0.46	0.28	654.18	522.78	1 086.66	892.00		—
35	0.27	0.18	—	—	—	—		—

—表示未测定实验动物在该温度点下代谢率。

—It means that the metabolic rate of the experimental animal had not determined at this temperature.

红瘰疣螈的能量代谢具备两栖动物共同的特征:代谢率较低,且随环境温度的变化而变化,但又不同于其他两栖动物。与无尾目动物东北林蛙和黑龙江林蛙相比,其代谢率显著低于这两种无尾目动物<sup>[17]</sup>,并且低温环境下尤为显著,在 5 ~ 10℃ 的温度范围内东北林蛙和黑龙江林蛙都还有较高的代谢率,但在 15℃ 以下红瘰疣螈的代谢率已经降至很低水平(表 3),

这与它们各自的环境因素、生活习性和呼吸方式有关,东北林蛙和黑龙江林蛙体型较小,且活动性较强,其生活环境温度一般较低,因而在相同温度条件下代谢率都显著高于红瘰疣螈,能适应更多变的环境。与同为有尾目的爪鲵相比,红瘰疣螈的代谢率也显著低,低温环境下尤为明显,在 6 ~ 15℃ 的温度范围内爪鲵还有相对较高的代谢率<sup>[18]</sup>,但在 15℃ 以下红瘰疣螈

的代谢率已经降至很低水平(表 3),这主要与它们各自适应不同的环境条件有关,爪鲵常年仅生活在距泉眼(源头) 50 m 内、水温 6 ~ 10℃ 水域中或附近,典型的森林冷水溪流型物种;而红瘰疣螈生活环境的温度在 21℃ 左右,较为温和,因而其在温和环境中代谢率较高,而在低温环境中代谢率极低。

随着环境温度的变化,雄性红瘰疣螈代谢率的变化幅度高于雌性,表明雄性红瘰疣螈的热敏感性高于雌性,这主要与雄性和雌性红瘰疣螈的生理规律有关;同时还可看出在各个温度条件下雌性红瘰疣螈的代谢率均低于雄性红瘰疣螈,这一趋势与无尾目的东北林蛙和黑龙江林蛙<sup>[17]</sup>相似。外温动物的代谢率与其本身的体重有重要关系<sup>[37-39]</sup>,动物体重与耗氧量的一般规律是:单位体重耗氧量随体重增加而下降。本研究表明体重是导致红瘰疣螈雌雄之间代谢率差异的重要因素,雌性红瘰疣螈的体重显著高于雄性红瘰疣螈,体重越小的个体单位体表面积越大,体表散热能力越强,其代谢率相对也较高。同时,本次实验所捕获的红瘰疣螈均为繁殖期个体,在繁殖尤其是求偶过程中雄性红瘰疣螈<sup>[9]</sup>、贵州疣螈(*Tylostotriton kweichowensis*)<sup>[21]</sup>、文县疣螈(*T. wenxianensis*)<sup>[40]</sup>、蓝尾蝾螈(*Cynops cyanurus*)<sup>[41]</sup>均有较高的活动性,这可能也是导致本次实验红瘰疣螈雄性代谢率高于雌性的原因之一。

综上所述,有尾目动物红瘰疣螈是典型的外源性动物,其代谢率、体温随着环境温度变化而变化,代谢率低与行为体温调节能力都较弱,对环境的适应能力也较弱。

致谢 感谢云南省生物能源与环境生物技术创新团队对本研究提供的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Gargaglioni L H, Milsom W K. Control of breathing in anuran amphibians. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2007, 147: 665 - 684.
- [2] 费梁, 叶昌媛, 黄永昭. 中国两栖动物检索. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1990, 1 - 364.
- [3] Nassbaum R A, Brodie Jr E D, Yang D. A taxonomic review of *Tylostotriton verrucosus* Anderson (Amphibia: Canuata: Salamandridae). *Herpetologica Austin*, 1995, 51(3): 257 - 268.
- [4] 杨大同. 云南两栖类志. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [5] 张服基. 有尾两栖动物. *生物学通报*, 1987, (1): 13 - 16.
- [6] 陈晓虹, 瞿文元. 我国现存有尾类及研究现状分析. *河南师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 28(1): 66 - 71.
- [7] 张明旺, 饶定齐, 余国华, 等. 从线粒体 Cyt b 基因探讨红瘰疣螈物种地位的有效性. *动物学研究*, 2007, 28(4): 430 - 436.
- [8] 胡健生, 周桐, 陈明勇, 等. 红瘰疣螈胚胎及胚后发育的观察 // 两栖爬行动物学会. *两栖爬行动物学研究: 第 9 辑*. 西宁: 青海人民出版社, 2002, 10 - 17.
- [9] 李成, 李胜全. 红瘰疣螈产卵过程的初步观察 // 两栖爬行动物学会. *两栖爬行动物学研究: 第 8 辑——亚洲两栖爬行动物学第四届国际学术会议专辑*. 贵阳: 贵州科技出版社, 2000, 242 - 244.
- [10] Ziegler T, Hartmann T, Straeten K V D, et al. Captive breeding and larval morphology of *Tylostotriton shanjing* Nussbaum, Brodie & Yang, 1995, with an updated key of the genus *Tylostotriton* (Amphibia: Salamandridae). *Der Zoologische Garten*, 2008, 77(4): 246 - 260.
- [11] 王培潮, 徐宏发. 环境温度对北草蜥体温和热能代谢的影响. *两栖爬行动物学报*, 1987, 6: 10 - 15.
- [12] 孟德荣. 环境温度对东亚钳蝎体温的影响及其对环境温度的选择. *动物学报*, 2001, 47(专刊): 66 - 71.
- [13] 孟德荣, 张桂然. 无蹼壁虎对环境温度的选择及体温调节. *动物学研究*, 2000, 21(5): 422 - 424.
- [14] Lin L H, Ji X, Lu H L. Variation in body temperature as a consequence of the response to heating lights under a light-dark cycle in the Chinese cobra *Naja atra*. *Acta Zoologica Sinica*, 2005, 51: 38 - 451.
- [15] Trullas S C, Terblanche J S, van Wyk J H, et al. Low repeatability of preferred body temperature in four species of Cordylid lizards: temporal variation and implications for adaptive significance. *Evolutionary Ecology*, 2007, 21: 63 - 79.
- [16] 陈麟, 熊洪林. 泽陆蛙夏末秋初体温与环境因子关系初探. *贵州农业科学*, 2009, 37(9): 155 - 158.
- [17] 张志影, 李殿伟, 赵文阁. 东北林蛙与黑龙江林蛙空气呼吸静置代谢率的研究. *野生动物*, 2008, 29(5): 244 - 247.
- [18] 王丽文, 梁传成, 黄薇, 等. 环境温度对爪鲵体温及能

- 量代谢的影响. *动物学报*, 2008, 54(4): 640 - 644.
- [19] Irwin L N, Talentino K A, Caruso D A. Effect of fasting and thermal acclimation on metabolism of juvenile axolotls *Ambystoma mexicanum*. *Experimental Biology*, 1998, 3: 1 - 9.
- [20] 杨大同. 我国十种两栖动物. *生物学通报*, 2000, 35(8): 1 - 4.
- [21] 田应州, 孙爱群, 李松. 贵州疣螈繁殖生态的研究. *四川动物*, 1998, 17(2): 60 - 64.
- [22] Hill R W. Determination of oxygen consumption by use of the paramagnetic oxygen analyzer. *Journal of Applied Physiology*, 1972, 33(2): 261 - 263.
- [23] Reading C J. The effects of variation in climatic temperature (1980 - 2001) on breeding activity and tadpole stage duration in the common toad, *Bufo bufo*. *The Science of the Total Environment*, 2003, 310(1/2/3): 231 - 236.
- [24] Loman J. Temperature, genetic and hydroperiod effects on metamorphosis of brown frogs *Rana arvalis* and *R. temporaria* in the field. *Journal of Zoology*, 2002, 258: 115 - 129.
- [25] Navas C A, Gomes F R, Carvalho J E. Thermal relationships and exercise physiology in anuran amphibians: integration and evolutionary implications. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2008, 151(3): 344 - 362.
- [26] Huey R B. Physiological Consequences of Habitat Selection. *The American Naturalist*, 1991, 137: S91 - S115.
- [27] Angilletta Jr. M J, Niewiarowski P H, Navas C A. The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal of Thermal Biology*, 2002, 27(4): 249 - 268.
- [28] Herczeg G, Gonda A, Saarikivi J, et al. Experimental support for the cost-benefit model of lizard thermoregulation. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2006, 60(3): 405 - 414.
- [29] 周小愿, 韩亚慧, 张林林, 等. 变温动物特殊动力作用的研究进展. *经济动物学报*, 2009, 13(2): 115 - 120.
- [30] 王德华, 王玉山, 王祖望. 华北农田大仓鼠的能量代谢特征及其体温调节. *动物学研究*, 2000, 21(6): 452 - 457.
- [31] 朱万龙, 贾婷, 李宗翰, 等. 冷驯化条件下大绒鼠的产热和能量代谢特征. *动物学报*, 2008, 54(4): 590 - 601.
- [32] 王政昆, 刘璐, 梁子卿, 等. 大绒鼠体温调节和产热特征. *兽类学报*, 1999, 19(4): 276 - 286.
- [33] Duellman W E, Trueb L. Relationship with the environment // Duellman W E, Trueb L. *Biology of Amphibian*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1986, 197 - 228.
- [34] Clarke B T. The natural history of amphibian skin secretions, their normal functioning and potential medical applications. *Biological Reviews*, 1997, 72(3): 365 - 379.
- [35] 赖仞, 赵宇, 刘衡, 等. 两栖类动物皮肤活性物质的利用和中国两栖类资源开发的策略. *动物学研究*, 2002, 23(1): 65 - 70.
- [36] 陆宇燕, 王健, 刘新海, 等. 爪鲵皮肤的显微结构和呼吸作用(图版 VI). *四川动物*, 2004, 23(3): 178 - 182.
- [37] Dutton. Energetics of the rusty lizard *Sceloporus olivaceus*. *Ecology*, 1975, 56: 1378 - 1387.
- [38] 田新贵, 冯莹, 刘玉文. 中国林蛙呼吸代谢的初步研究. *襄樊学院学报*, 2001, 22(2): 79 - 82.
- [39] 赵凤军. 中国林蛙呼吸速率的研究. *河北林业科技*, 2005, 6: 9 - 10.
- [40] 龚大洁, 牟迈, 李晓鸿, 等. 文县疣螈繁殖初探. *动物学杂志*, 2008, 43(4): 48 - 55.
- [41] 费梁, 叶昌媛. 蓝尾蝾螈繁殖生态的研究. *生态学报*, 1988, 8(3): 233 - 241.