

# 青海沙蜥的热耐受性、选择体温及摄食和运动表现的热依赖性

舒霖<sup>1,2</sup>, 张群利<sup>1</sup>, 屈彦福<sup>1</sup>, 计翔<sup>1,\*</sup>

(1. 南京师范大学生命科学学院, 南京 210046; 2. 浙江工业大学浙西分校, 衢州 324000)

**摘要:**研究了青海沙蜥(*Phrynocephalus vlangalii*)成体的选择体温、热耐受性及食物同化和运动表现的热依赖性。结果显示:选择体温、临界低温和临界高温无显著的两性差异,其平均值分别为33.3、0.9℃和46.9℃。在27—35℃实验温度范围内,体温显著影响日摄食量,表观消化系数(ADC)和同化效率(AE)无显著影响。停顿次数随着体温的升高而降低,至39℃时停顿次数最少,但与37℃和41℃处理下的停顿次数无显著差异。疾跑速在17—39℃范围内随体温升高而加快,在39℃体温下最快。体温大于39℃后速度减慢。在17—27℃体温范围内,随体温的升高持续运动距离无显著差异。持续运动距离在29—41℃体温下大于较低体温(17—27℃)下的测定值。

**关键词:**鬣蜥科;青海沙蜥;选择体温;热耐受性;疾跑速;食物同化

## Thermal tolerance, selected body temperature and thermal dependence of food assimilation and locomotor performance in the Qinghai toad headed lizard, *Phrynocephalus vlangalii*

SHU Lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Qunli<sup>1</sup>, QU Yanfu<sup>1</sup>, JI Xiang<sup>1,\*</sup>

1 College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Zhejiang University of Technology, Zhexi Campus, Quzhou 324000, China

**Abstract:** Temperature is the single most important environmental factor affecting many biological processes in organisms. Ectotherms are viable under a wide range of body temperatures, but their physiological processes and behavioral performances are usually maximized at moderate to relatively high body temperatures. We collected Qinghai toad-headed lizards (*Phrynocephalus vlangalii*; Agamidae) in August 2005 from a population in Qinghai (northwestern China) and used adults to study selected body temperature ( $T_{sel}$ ), thermal tolerance [critical thermal minimum ( $CT_{min}$ ) and critical thermal maximum ( $CT_{max}$ )] and the thermal dependence of food assimilation and locomotor performance.  $T_{sel}$  was measured on a laboratory thermal gradient ranging from 18 °C to 60 °C (20 mm above the terrarium floor);  $CT_{min}$  and  $CT_{max}$  were determined in an incubator, with lizards being cooled or heated from 28 °C at the rate of 0.25 °C per minute and more slowly when temperatures inside the incubator were lower than 5 °C or higher than 40 °C. We did not find between-sex differences in  $T_{sel}$ ,  $CT_{min}$  and  $CT_{max}$ , and thus pooled data for both sexes. The mean values for  $T_{sel}$ ,  $CT_{min}$  and  $CT_{max}$  were 33.3 °C, 0.9 °C and 46.9 °C, respectively. Within the range from 27 °C to 35 °C, body temperature affected daily food intake but had no important role in influencing apparent digestive coefficient and assimilation efficiency. Thus, consistent with the results reported for a wide range of lizard taxa, our data show that digestive performance is less sensitive to variation in body temperature in *P. vlangalii*. The number of stops in the racetrack decreased with increase in body temperature within the range from 17 °C to 39 °C, and then increased at 41 °C. Sprint speed increased with increase in body temperature within the range from 17 °C to 39 °C, and then decreased at 41 °C. The mean values for the length of

基金项目:生物多样性与生物技术江苏省重点实验室资助项目(JSKLBB2008KF-03)

收稿日期:2009-09-03; 修订日期:2010-01-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xji@mail.hz.zj.cn

continuous locomotion were overall greater at higher body temperatures (29 – 41 °C) than at lower temperatures (17 – 27 °C). Overall, body temperatures within the range of 33 – 41 °C were optimal for locomotion. When comparing our data with those reported for temperate and warm-climate lizards, we found that body temperatures maximizing locomotor performance are relatively high in *P. vlangalii*. Our data support the idea that  $T_{sel}$  represents the body temperature at which numerous processes function at a relatively high level, as revealed by the fact that  $T_{sel}$  fell within the range of temperatures optimal for locomotor performance in *P. vlangalii*. Inter-specific comparisons reveal that lizards using different habitats and occupying different geographic (climatic) regions differ in both  $CT_{min}$  and  $CT_{max}$ . Overall,  $CT_{min}$  is greater in lizards using warmer habitats or living in warmer localities, and  $CT_{max}$  is greater in lizards using opened habitats. Qinghai toad-headed lizards are typically found in open spaces in arid or semi-arid regions covered sparse vegetation. The region occupied by *P. vlangalii* is climatically severe, where daily and seasonal fluctuations in ambient temperature are very pronounced. Thus, the enhanced ability to tolerate temperature extremes seen in *P. vlangalii* is likely determined evolutionarily as a consequence of adaptation to local thermal conditions.

**Key Words:** agamidae; *Phrynocephalus vlangalii*; thermal tolerance; selected body temperature; sprint speed; food assimilation

动物的形态、生理活动和行为表现受环境温度影响<sup>[1]</sup>。环境温度可通过改变爬行动物的体温影响其运动<sup>[2]</sup>、摄食<sup>[3]</sup>、同化<sup>[4]</sup>、能量代谢<sup>[5]</sup>、生长繁殖<sup>[6]</sup>、胚胎发育<sup>[7]</sup>、免疫功能<sup>[8]</sup>等。适宜的体温有利于爬行动物呈现正常的行为并高水平地表达生理潜力,极端体温对爬行动物有害甚至可导致其死亡。在爬行动物中,不同的行为表现和生理功能的最适温度和热敏感性存在一定程度的种内和种间差异,没有任何特定的温度能使所有的行为表现和生理功能发挥至最高水平<sup>[9]</sup>。野外条件下,爬行动物可利用外热源,通过改变姿势、调整活动时间和阴阳穿梭等行为方式,将体温维持在相对较高或稳定的水平,以较好地表达各项功能<sup>[10]</sup>。因此,在实验室可以利用梯度热环境测得的平均体温作为选择体温( $T_{sel}$ ),用于估算爬行动物在没有任何生物和非生物限制条件下试图通过行为调温达到的体温水平。在均质热环境(如地下、水中和深层密林下)中,爬行动物的体温因行为调温受到限制而与环境温度相近或一致<sup>[7]</sup>。均质热环境可在恒温实验室内构建,用于测定爬行动物热耐受性的临界高温( $CT_{max}$ )、临界低温( $CT_{min}$ )和特定体温下的功能表现。

摄食和运动是爬行动物的两项重要的日常活动,其表现水平与动物的适合度相关。摄食活动中所获得的物质和能量可用于组织生长和后代输出<sup>[6]</sup>,而运动表现对爬行动物逃避天敌、强化觅食成功率具有重要的作用<sup>[4, 11]</sup>。因此,定量研究温度对爬行动物的食物同化和运动表现的影响具有重要的生态学意义。

青海沙蜥(*Phrynocephalus vlangalii*)是我国特有种,主要分布于青海省和四川省<sup>[12]</sup>。有关青海沙蜥的研究主要涉及分类和形态<sup>[13]</sup>、繁殖和两性异性<sup>[14]</sup>、系统地理学<sup>[15]</sup>等,未见该种热生物学方面的研究。本文对青海沙蜥的报道主要涉及:(1)  $T_{sel}$ 、 $CT_{min}$ 和 $CT_{max}$ 的测定;(2) 温度对摄食量、表观消化系数(ADC)、同化效率(AE)以及疾跑速和跑道停顿次数等运动表现的影响。本项工作旨在探讨高寒地区变温动物的热适应机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 动物采集与饲养

研究用青海沙蜥于2005年8月采集自青海省共和县(36°29'N, 101°09'E),均为体长(SVL)大于56 mm的成体<sup>[14]</sup>。蜥蜴运至南京实验室,经测量、称重后,饲养在玻璃缸(900 mm × 650 mm × 500 mm)内,缸内铺以沙土和瓦片使生境复杂化。玻璃缸被放置在不超过20 °C的空调间内,缸一端悬挂2只100 W灯泡作为蜥蜴体温调节的热源,灯泡开启期间缸内形成20—60 °C的温度梯度,蜥蜴在其中可进行自主体温调节。蜥蜴在缸内可以自由摄食黄粉虫(*Tenebrio molitor*)幼虫,定期在饮水中添加21金维他和儿童钙粉,以保证蜥蜴的营养需求。

## 1.2 $T_{sel}$ 、 $CT_{min}$ 和 $CT_{max}$ 测定

蜥蜴在实验室驯养一周后,依次进行  $T_{sel}$ 、 $CT_{min}$  和  $CT_{max}$  测定。每项测定前,将蜥蜴关养在 28 °C 恒温室内 1 d。由于蜥蜴未在特定热环境中做 2 周以上热驯化,故视捕获当时野外热环境为其天然驯化环境。用于  $T_{sel}$  测定的蜥蜴(15 ♀♀:15 ♂♂)SVL 为 62—75 mm,平均 SVL 为 66 mm。测定前将玻璃缸移入 18 °C 空调间,缸一端悬挂 2 只 100 W 灯泡,缸底部用细沙、瓦片和草皮等复杂化,随机放置 5 个直径为 100 mm 的饮水皿。光周期设置为 14 L:10 D,7:00 时灯泡自动开启,开启后能在缸内形成 18—60 °C 的连续温度梯度。蜥蜴从低温端移入,翌日 15:00—16:00 时期间用 WMZ-03 型点温计(上海精华仪器厂)测量泄殖腔温度。将活动蜥蜴泄殖腔温度的平均值作为  $T_{sel}$  [16-17]。

用于  $CT_{max}$  和  $CT_{min}$  测定的蜥蜴(8 ♀♀:8 ♂♂)SVL 为 61—75 mm,平均 SVL 为 68 mm。将蜥蜴移入预先设置为 28 °C 的 LRH-250A 生化培养箱(广东医疗器械厂)内,按 0.25 °C/min 递增或递减的速率调节箱内温度。以蜥蜴在强刺激下不能作出反应(眨眼、翻身和爬动),移出培养箱后能恢复正常为标准确定  $CT_{max}$  和  $CT_{min}$  [11, 16]。

## 1.3 摄食量和食物同化

实验在恒温室内进行,日光灯照明,光照周期为 12 L:12 D,7:00—19:00 时为日光灯自动开启。实验温度为 27、29、31、33 °C 和 35 °C。将 SVL 平均为 66 mm、范围为 57—75 mm 的蜥蜴(36 ♀♀:41 ♂♂)随机编排的 5 个实验温度中。蜥蜴单个关养在 200 mm × 150 mm × 200 mm 的玻璃缸中,在各自实验温度下禁食至无粪粪排出后称重,随后提供足量的面包虫和饮水。光照期间每天至少 5 次收集粪尿。记录停止喂食时间,取走剩余面包虫,将动物禁食至无粪粪排出后称重。收集到的粪、尿以及剩余的面包虫在 65 °C 烘箱中干燥至恒重,分别称重,随后用 WZR-1A 型弹式氧弹仪(长沙仪器厂)测出能量。摄食量以每天每克体重摄入食物的能量表示 [11, 18]。 $ADC = (I(F)/I \times 100\%$  [19],  $AE = (I(F(U))/I \times 100\%$  [20], 其中  $I$  为摄入食物能量,  $F$  为粪能,  $U$  为尿能。各温度实验历时 4 周。

## 1.4 运动表现

实验蜥蜴(10 ♀♀:11 ♂♂)SVL 平均为 67 mm、范围为 56—73 mm,用 LRH-250A 生化培养箱将蜥蜴体温控制在 19—41 °C 范围内,间隔 2 °C 设 1 个温度梯度,分别测定其运动表现。测定的温度顺序随机化,每天完成一个温度测定。在 2000 mm × 15 mm × 50 mm 的直形跑道中测定实验蜥蜴的运动表现,1 人强烈驱赶(但不推动)蜥蜴,另 1 人用 Panasonic NV-DS77 数码摄像机记录蜥蜴在跑道中 1 个来回的运动表现。疾跑速为蜥蜴跑过 250 mm 的最大速度;持续运动距离为蜥蜴不间断跑动的最大距离;跑道停顿次数为蜥蜴在跑道运动过程中的停顿次数,回程转折点的停顿不计入 [16]。

## 1.5 数据分析

数据作参数统计分析前,分别检验其正态性(Kolmogorov-Smirnov test)和方差同质性( $F$ -max test)。除摄食量外,个体大小与比较的变量之间缺乏线性关系。单因子协方差分析(ANCOVA)检验温度对摄食量的影响,单因子方差分析(ANOVA)来检验  $T_{sel}$ 、 $CT_{max}$  和  $CT_{min}$  的两性差异以及温度对  $ADC$  和  $AE$  的影响,重复测量方差分析(ANOVA)分析体温对运动表现的影响,用 Tukey 多重比较检验多样本各处理彼此间的差异,用偏相关分析检测疾跑速、持续运动距离和跑道停顿次数之间的关系。文中所有描述性统计值均用平均值 ± 标准误表示,显著性水平设置为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 $T_{sel}$ 、 $CT_{min}$ 和 $CT_{max}$

成体  $T_{sel}$  ( $F_{1,28} = 0.27$ ,  $P = 0.61$ )、 $CT_{min}$  ( $F_{1,14} = 0.83$ ,  $P = 0.38$ ) 和  $CT_{max}$  ( $F_{1,14} = 0.44$ ,  $P = 0.52$ ) 无显著的两性差异(表 1)。不同个体间临界高温和临界低温差异较小, $CT_{max}$  和  $CT_{min}$  的个体变异幅度分别为 1.7 °C 和 1.9 °C(表 1)。

表 1 青海沙蜥选择体温、临界低温和临界高温的描述性统计值

Table 1 Descriptive statistics for selected body temperature, critical thermal minimum and critical thermal maximum of *P. vlangalii*

性别 Sex	选择体温 Selected body temperature/°C	临界低温 Critical thermal minimum/°C	临界高温 Critical thermal maximum/°C
雄体 Male	33.1 ± 0.6 (N = 15) 28.4—36.9	0.8 ± 0.1 (N = 8) 0.4—1.4	47.0 ± 0.1 (N = 8) 46.2—47.3
雌体 Female	33.6 ± 0.6 (N = 15) 29.7—38.8	1.1 ± 0.3 (N = 8) 0.1—2.0	46.8 ± 0.2 (N = 8) 45.7—47.4

## 2.2 摄食量和食物同化

各温度组的摄食量(ADC)和食物同化(AE)均无显著的两性差异( $P > 0.05$ ),故合并两性数据进行统计分析。蜥蜴初始体重的组间差异显著(ANOVA,  $F_{4,72} = 3.48$ ,  $P = 0.01$ ),去除体重影响后,温度对青海沙蜥摄食量有显著影响(ANCOVA,  $F_{4,71} = 26.95$ ,  $P < 0.0001$ )。较低(27 °C)和较高(35 °C)温度的摄食量低于中间温度。温度对青海沙蜥的ADC和AE均无显著影响(ANOVA,  $P > 0.05$ )(表 2)。

表 2 青海沙蜥的初始体重、摄食量、ADC 和 AE

Table 2 Initial body mass, food intake, apparent digestive coefficient and assimilation efficiency of adult *P. vlangalii*

温度 Temperature/°C	样本数 N	初始体重 Initial body mass /g	摄食量 Daily food intake /(J·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	表观消化系数 ADC/%	同化效率 AE/%
27	14	9.4 ± 0.3	139.2c ± 9.0	91.4 ± 0.8	83.0 ± 1.1
		7.5—11.6	94.0—223.5	83.5—94.0	75.3—88.1
29	14	10.5 ± 0.3	303.5a ± 12.6	89.8 ± 0.7	80.3 ± 0.6
		8.9—12.5	220.4—384.8	84.7—93.1	76.8—82.8
31	14	11.1 ± 0.4	247.0b ± 18.0	90.2 ± 0.5	80.4 ± 0.9
		8.6—13.6	118.58—354.28	87.2—92.1	70.4—84.3
33	16	10.1 ± 0.4	259.7ab ± 19.0	90.4 ± 0.5	81.1 ± 0.8
		7.3—13.8	122.3—386.5	87.3—94.9	71.0—86.2
35	19	9.8 ± 0.3	172.9c ± 11.1	92.8 ± 0.4	82.3 ± 0.8
		7.7—12.9	98.7—312.4	88.5—95.2	71.8—86.5

具有不同上标的平均值差异显著(Tukey's 检验,  $\alpha = 0.05$ , a > b > c)

## 2.3 运动表现的热依赖性

疾跑速、停顿次数和持续运动距离均与蜥蜴体长无关( $P > 0.05$ )。重复测量方差分析显示,疾跑速( $F_{1,20} = 1.38$ ,  $P = 0.26$ )和持续运动距离( $F_{1,20} = 3.28$ ,  $P = 0.09$ )无显著两性差异,两性疾跑速和持续运动距离平均值分别为 87.2 cm/s 和 112.0 cm;停顿次数( $F_{1,20} = 5.57$ ,  $P = 0.03$ )两性差异显著,雌性停顿次数平均值大于雄性(6.5 vs 5.4)。温度对疾跑速( $F_{12,240} = 27.41$ ,  $P < 0.001$ )、跑道停顿次数( $F_{12,240} = 7.21$ ,  $P < 0.001$ )和持续运动距离( $F_{12,240} = 4.48$ ,  $P < 0.001$ )均有显著的影响。在各温度处理中,疾跑速随体温升高而加快,39 °C 体温疾跑速达到最大(图 1);停顿次数则随着体温的升高迅速减少,39 °C 体温停顿次数最少,但与其它高温(37 °C 和 41 °C)处理下的停顿次数无显著差异(图 1)。体温在 39 °C 时蜥蜴的持续运动距离最长,但体温为 17—27 °C 时持续运动距离无显著差异;体温超过 27 °C 后,持续运动距离随体温升高而显著加大,39 °C 达到最大值(图 1)。疾跑速与持续运动距离无关( $r = 0.06$ ,  $t = 0.94$ ,  $df = 283$ ,  $P = 0.349$ ),停顿次数与持续运动距离呈负相关( $r = -0.66$ ,  $t = 14.77$ ,  $df = 283$ ,  $P < 0.0001$ ),疾跑速与停顿次数呈负相关( $r = -0.23$ ,  $t = 4.02$ ,  $df = 283$ ,  $P < 0.0001$ )。

## 3 讨论

爬行动物的  $T_{sel}$ 反映了动物对多种功能表现最佳温度进行权衡的结果,其测定值受动物营养状态、发育阶段、性别差异、地理分布、季节差异和驯化经历等多种内外因素的影响<sup>[6, 17, 21-22]</sup>。利用郁闭生境的印度蜥蜴(*Sphenomorphus indicus*)选择体温相对较低(26 °C)<sup>[18]</sup>。利用开阔生境的蜥蜴选择体温相对较高,中国石龙子

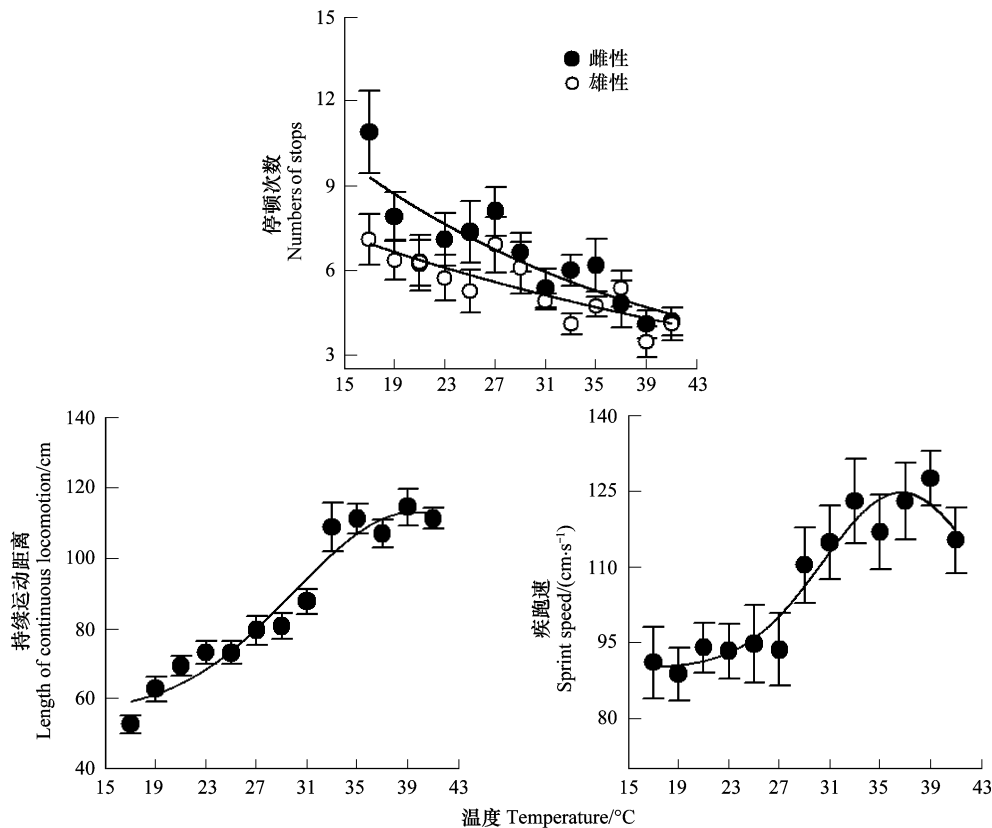


图1 不同体温青海沙蜥运动表现描述性统计值

Fig. 1 Descriptive statistics for locomotor performance of adult *P. vlangalii* at different body temperatures

两性持续运动距离和疾跑速数据因无显著差异而被合并

(*Eumeces chinensis*)<sup>[16]</sup>、蓝尾石龙子 (*E. elegans*)<sup>[23]</sup>、山地麻蜥 (*Eremias brenchleyi*)<sup>[21]</sup>、丽斑麻蜥 (*E. argus*)<sup>[24]</sup>、北草蜥 (*Takydromus septentrionalis*)<sup>[11]</sup> 和南草蜥 (*T. sexlineatus*)<sup>[25]</sup> 选择体温分别约为 31、30、34、36、30℃ 和 32℃。山地麻蜥成体选择体温 (34℃) 高于幼体 (32℃)，变色树蜥 (*Calotes versicolor*) 成体 (33℃) 选择体温也略高于幼体 (32℃)<sup>[7]</sup>，可能与成幼体野外生境利用或活动时间存在差异有关。部分蜥蜴选择体温存在两性差异，如蓝尾石龙子雄体 (30℃) 高于雌性 (27℃)。选择体温与蜥蜴繁殖状态也有一定关系，雌体在孕期体温发生向下或向上漂移为胚胎发育提供适宜的热环境。例如，胎生蜥蜴 (*Zootoca vivipara*)<sup>[26]</sup>、印度蜓蜥<sup>[17]</sup> 和多线南蜥 (*Mabuya multifasciata*)<sup>[27]</sup> 孕期母体选择体温偏低，而刺尾蜥 (*Uromastix philbyi*)<sup>[28]</sup> 孕期母体体温则较非繁殖状态更高。即便是同一物种，不同的纬度也会产生选择体温的偏移。一般来说高纬度种群较低纬度种群的选择体温要高，如秦岭地区的北草蜥种群 (34℃) 在相同季节的选择体温略高于丽水种群 (33℃)<sup>[22]</sup>。处于禁食状态下的北草蜥选择体温低于非禁食状态的蜥蜴，主要是由于低的体温可以减少能量消耗，维持机体正常的代谢和活动所需<sup>[29]</sup>。

$CT_{max}$  和  $CT_{min}$  测定值也与相关动物的发育阶段、性别、地理分布和营养状况等诸多内外因素有关<sup>[17]</sup>。就蜥蜴而言，高纬度地区的物种具有较低的  $CT_{min}$  和较高的  $CT_{max}$ 。例如，丽斑麻蜥的  $CT_{max}$  和  $CT_{min}$  分别约为 45℃ 和 1℃<sup>[24]</sup>，而生活在低纬度地区的南草蜥则具有较低的  $CT_{max}$  (42℃) 和较高的  $CT_{min}$  (6℃)<sup>[25]</sup>；北草蜥雄性 (42℃) 的  $CT_{max}$  略高于雌性 (41℃)，而雄性 (4℃) 的  $CT_{min}$  则略低于雌性 (6℃)<sup>[11]</sup>；山地麻蜥成体 (42℃) 的  $CT_{max}$  略高于幼体 (41℃)，而成体 (4℃) 的  $CT_{min}$  则略低于幼体 (6℃)<sup>[21]</sup>。这些差异可能与不同性别或发育阶段的蜥蜴选择不同的生境有关。青海沙蜥的  $T_{sel}$  和  $CT_{max}$  值较高、 $CT_{min}$  值较低，与该种所生活的西北地区独特的热环境有关。青海地区生境开阔、年平均气温 ((4—8℃) 较低且年平均气温日较差 (12—

16 °C)较大,生活在该地区的蜥蜴选择较高的体温、具有较强的高温和低温耐受性,可更好地适应当地的热环境。

*ADC* 和 *AE* 测定值受季节、肠道内消化酶活性、食物通过时间及摄入食物的数量和类型等因素影响<sup>[4, 23]</sup>。例如,食草动物的 *ADC* 和 *AE* 值一般高于食肉或食虫动物<sup>[30]</sup>。在特定季节和食物的情况下,消化酶活性高、食物在消化道中滞留时间(食物通过时间)长的蜥蜴呈现较大的 *ADC* 和 *AE* 值<sup>[16, 20, 23]</sup>。本项研究显示:青海沙蜥 *AE* 和 *ADC* 无显著的组间差异,这一结果与蜥蜴同化效率热敏感性相对较低有关。

运动表现被认为是一个对动物适合度有重要影响的特征,并受众多生理和生态因素的影响<sup>[31]</sup>。青海沙蜥疾跑速与其他蜥蜴类动物的研究结果相一致,随体温升高而加快。当体温达到一定温度时,疾跑速随体温的增加而减慢,如胎生蜥蜴<sup>[26]</sup>、中国石龙子<sup>[16]</sup>、北草蜥<sup>[11]</sup>、蓝尾石龙子<sup>[23]</sup>、白条草蜥(*T. wolteri*)<sup>[9]</sup>、南草蜥<sup>[25]</sup>和山地麻蜥<sup>[21]</sup>。持续运动距离与跑道停顿次数呈负相关的结果是可以预见的,但持续运动距离长并不代表蜥蜴运动速度快,与青海沙蜥相似(图 1),体温较低的山地麻蜥可以较低的速度作较长距离的运动<sup>[21]</sup>。同样,疾跑速与持续运动距离呈正相关,与蜥蜴在较快运动时跑过较长的距离有关。跑道停顿次数与疾跑速之间成负相关,因为过多的停顿次数导致蜥蜴在规定的长度内无法快速运动。然而,体温过低或过高显然都不利于青海沙蜥较好地表达其运动潜力。青海沙蜥在低体温下运动表现差主要与疾跑速低、停顿次数多和持续运动距离短有关;高体温表现差则与疾跑速低和持续运动距离短直接相关(图 1)。由于疾跑速代表蜥蜴的最大运动潜力,持续运动距离代表蜥蜴的最大运动耐力,那些疾跑速快、持续运动距离长的青海沙蜥被视为运动表现较好的个体,而能使蜥蜴运动达到最佳表现的温度是运动表现的最适温度。因此,33—41 °C 是青海沙蜥运动能力的适宜体温范围。

## References:

- [ 1 ] Cossins A R, Bowler K. Temperature biology of animals. London: Chapman and Hall, 1987.
- [ 2 ] Bennett A F. The thermal dependence of lizard behavior. *Animal Behaviour*, 1980, 28: 752-762.
- [ 3 ] Ayers D Y, Shine R. Thermal influences of foraging ability: body size, posture and cooling rate of an ambush predator, the python *Morelia spilota*. *Functional Ecology*, 1997, 11: 342-347.
- [ 4 ] McConnachie S, Alexander G J. The effect of temperature on digestive and assimilation efficiency, gut passage time and appetite in an ambush foraging lizard, *Cordylus melanotus*. *Journal of Comparative Physiology B*, 2004, 174: 99-105.
- [ 5 ] Patterson J W, Davies P M C. A possible effect of climate on resting metabolic rate in lizards. *Copeia*, 1989, 1989: 719-723.
- [ 6 ] Angilletta M J, Niewiarowski P H, Navas C A. The evolution in ectotherms. *Journal of Thermal Biology*, 2002, 27: 249-268.
- [ 7 ] Qiu Q B, Zeng X B, Lin L H, Ji X. Selected body temperature, thermal tolerance and influence of temperature on food assimilation in the oriental garden lizard, *Calotes versicolor* (Agamidae). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 1738-1744.
- [ 8 ] Mondal S, Rai U. In vitro effect of temperature on phagocytic and cytotoxic activities of splenic phagocytes of the wall lizard, *Hemidactylus flaviviridis*. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2001, 129: 391-398.
- [ 9 ] Chen X J, Xu X F, Ji X. Influence of body temperature on food assimilation and locomotor performance in white-striped grass lizards, *Takydromus wolteri* (Lacertidae). *Journal of Thermal Biology*, 2003, 28: 385-391.
- [ 10 ] Avery R A. Field studies of body temperatures and thermoregulation//Gans C, Pough F H eds. *Biology of the Reptilia*. Vol. 12: Physiological Ecology. New York: Academic Press, 1982: 93-166.
- [ 11 ] Ji X, Du W G, Sun P Y. Body temperature, thermal tolerance and influence of temperature on sprint speed and food assimilation in adult grass lizards, *Takydromus septentrionalis*. *Journal of Thermal Biology*, 1996, 21: 155-161.
- [ 12 ] Zhao E M, Zhao K T, Zhou K Y. *Fauna Sinica Reptilia* Vol. 2. Squamata. Lacertilia. Beijing: Science Press, 1999.
- [ 13 ] Jin Y T, Tian R R, Liu N F. Altitudinal variations of morphological characters of *Phrynocephalus* sand lizards: on the validity of Bergmann's and Allen's rules. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52: 838-845.
- [ 14 ] Zhang X D, Ji X, Luo L G, Gao J F, Zhang L. Sexual dimorphism and female reproduction in the Qinghai toad-headed lizard *Phrynocephalus vlangalii*. *Acta Zoologica Sinica*, 2005, 51: 1006-1012.
- [ 15 ] Jin Y T, Richard P B, Liu N F. Cladogenesis and phylogeography of the lizard *Phrynocephalus vlangalii* (Agamidae) on the Tibetan Plateau. *Molecular Ecology*, 2008, 17: 1971-1982.

- [16] Ji X, Zheng X Z, Xu Y G, Sun R M. Some aspects of thermal biology of the skink (*Eumeces chinensis*). *Acta Zoologica Sinica*, 1995, 41: 268-274.
- [17] Hutchison V H. Factors influencing thermal tolerances of individual organisms// Esch G W, McFarlane R W eds. *Thermal Ecology 11. Proc. 2nd SREL Thermal Ecology Symposium*. Oak Ridge: U. S. National Technical Information Service, 1976: 10-26.
- [18] Ji X, Sun P Y, Du W G. Selected body temperature, thermal tolerance and food assimilation in a viviparous skink, *Sphenomorphus indicus*. *Netherlands Journal of Zoology*, 1997, 47: 103-110.
- [19] Waldschmidt S R, Jones S M, Porter W P. The effect of body temperature and feeding regime on activity, passage time, and digestive coefficient in the lizard *Uta stansburiana*. *Physiological Zoology*, 1986, 59: 376-383.
- [20] Ji X, Zhou W H, He G B, Gu H Q. Food intake, assimilation efficiency and growth in juvenile lizards, *Takydromus septentrionalis*. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 1993, 105: 283-285.
- [21] Xu X F, Ji X. Ontogenetic shifts in thermal tolerance, selected body temperature and thermal dependence of food assimilation and locomotor performance in a lacertid lizard, *Eremias brenchleyi*. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2006, 143: 118-124.
- [22] Yang J, Sun Y Y, An H, Ji X. Northern grass lizards (*Takydromus septentrionalis*) from different populations do not differ in thermal preference and thermal tolerance when acclimated under identical thermal conditions. *Journal of Comparative Physiology B*, 2008, 178: 343-349.
- [23] Du W G, Yan S J, Ji X. Selected body temperature, thermal tolerance and thermal dependence of food assimilation and locomotor performance in adult blue-tailed skinks, *Eumeces elegans*. *Journal of Thermal Biology*, 2000, 25: 197-202.
- [24] Luo L G, Qu Y F, Ji X. Thermal dependence of food assimilation and sprint speed in a lacertid lizard (*Eremias argus*) from northern China. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52: 256-262.
- [25] Zhang Y P, Ji X. The thermal dependence of food assimilation and locomotor performance in southern grass lizards, *Takydromus sexlineatus* (Lacertidae). *Journal of Thermal Biology*, 2004, 29: 45-53.
- [26] Van Damme R, Bauwens D, Verheyen R F. Selected body temperature in the lizard *Lacerta vivipara*: variation within and between populations. *Journal of Thermal Biology*, 1986, 2: 219-222.
- [27] Ji X, Lin C X, Lin L H, Qiu Q B, Du Y. Evolution of viviparity in warm-climate lizards: an experimental test of the maternal manipulation hypothesis. *Journal of Evolutionary Biology*, 2007, 20: 1037-1045.
- [28] Zari T A. Effects of sexual condition on food consumption and temperature selection in the herbivorous desert lizard, *Uromastix philbyi*. *Journal of Arid Environment*, 1998, 38: 371-377.
- [29] Du Y, Ding G H, Sun Y Y, Ji X. Northern grass lizards *Takydromus septentrionalis* (Lacertidae) shift thermal preferences when fasted. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54: 739-743.
- [30] Ballinger R E, Holscher V L. Assimilation efficiency and nutritive state in the striped plateau lizard, *Sceloporus virgatus* (Sauria, Iguanidae). *Copeia*, 1983, 1983: 838-839.
- [31] Huey R B, Pianka E R. Ecological consequences of foraging mode. *Ecology*, 1981, 62: 991-999.

#### 参考文献:

- [7] 邱清波, 曾小彪, 林隆慧, 计翔. 变色树蜥 (*Calotes versicolor*) 选择体温、热耐受性及温度对食物同化的影响. *生态学报*, 2009, 29: 1738-1744.
- [12] 赵尔宓, 赵肯堂, 周开亚. 中国动物志. 爬行纲(第二卷). 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] 计翔, 郑向忠, 徐永根, 孙如明. 中国石龙子热生物学的研究. *动物学报*, 1995, 41: 268-274.
- [28] 杜宇, 丁国骅, 孙燕燕, 计翔. 北草蜥禁食期间喜好体温的漂移. *动物学报*, 2008, 54: 739-743.