

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

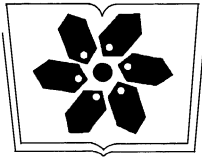
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203070312

李宏,周宗师,吴延庆,林隆慧,林焯贤. 中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测. 生态学报, 2012, 32(23): 7255-7263.
Li H, Zhou Z S, Wu Y Q, Lin L H, Lin C X. Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7255-7263.

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型: 母体操纵假说的实验检测

李 宏¹, 周宗师¹, 吴延庆¹, 林隆慧^{2, 3}, 林焯贤^{2, *}

(1. 南京师范大学生命科学学院江苏省生物多样性与生物技术重点实验室, 南京 210046;

2. 琼州学院生物科学与技术学院海南省两栖爬行动物研究重点实验室, 三亚 572022;

3. 杭州师范大学生命科学学院杭州市动物适应与进化重点实验室, 杭州 310036)

摘要: 卵胎生是由卵生繁殖模式通过逐渐增加卵滞留和胚胎在母体子宫内发育的时间进化而来的繁殖模式。有鳞类爬行动物(蜥蜴和蛇)有着较高的繁殖模式多样性, 因而是研究卵胎生繁殖模式进化及其适应意义的理想动物模型。至今对于卵胎生进化的选择压力尚无定论, 目前有 3 种关于卵胎生进化的假说受到学者的关注, 其中母体操纵假说最受关注但尚未得到充分的检测。研究继 1995 年母体操纵假说提出之后, 以栖息于温带气候环境下的卵生中国石龙子(*Eumeces chinensis*)为模型动物检测该假说。37 条中国石龙子怀卵母体采自浙江丽水市郊。将怀卵母体分置于 3 个热处理中, 其中 12 条母体提供每日 14 h 光照时间, 13 条母体提供 10 h 光照, 其余 12 条母体没有任何调温机会(体温随室内环境温度而改变)。结果显示: 怀卵母体选择体温向下漂移。3 种处理下的雌体繁殖特征没有显著差异。长、短调温组下母体产卵时间要早于非调温组母体, 但新生卵的胚胎历期没有显著差异。用 5 种热处理孵化卵, 孵化温度分别为: 1=室内波动温度孵化; 2=27 °C; 3=24—30 °C; 4=22—32 °C (3 和 4 孵化处理中, 孵化箱内的温度每隔 1d 改变 1 次, 即卵分别在 22 和 24 °C 孵化 24 h, 随后在 32 和 30 °C 孵化 24 h, 每 2d 循环 1 次直至孵出); 5=在实验室后院模拟石龙子野外巢址孵化。结果显示: 孵出幼体的体长、腹长和头部大小(头长和头宽)在 3 个母体热处理间存在显著差异, 其他形态学特征不存在母体热处理间的显著差异; 孵化温度以及孵化温度和母体热处理的交互作用对所有的幼体形态学特征均无显著影响。孵化温度以及孵化温度和母体热处理的交互作用对幼体疾跑速和最大持续运动距离无显著影响; 但不同的母体热处理显著影响幼体疾跑速和最大持续运动距离。研究结果不仅为“热变异对在一定孵化温度范围内表型无显著变化的物种的幼体表型没有重要的修饰作用”这一假说提供了有力证据, 并且支持母体操纵假说的两个主要预测: 雌体在孕期通过体温漂变行为提供体内胚胎发育的最适热环境, 而由母体调温行为诱导的后代表型的变异将增强后代的适合度。

关键词: 中国石龙子; 母体孕期体温; 卵胎生进化; 母体操纵假说; 表型

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis

LI Hong¹, ZHOU Zongshi¹, WU Yanqing¹, LIN Longhui^{2, 3}, LIN Chixian^{2, *}

1 Jiangsu Key Laboratory for Biodiversity and Biotechnology & Institute of Genetic Resources, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Hainan Key Laboratory for Herpetology, School of Bioscience and Biotechnology, Qiongzhou University, Sanya 572022, China

3 Hangzhou Key Laboratory for Animal Adaptation and Evolution, School of Life Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(31060064); 江苏省高校自然科学基金项目(11KJB180004); 海南省重点科技计划项目(ZDXM20110008)

收稿日期: 2012-03-07; **修订日期:** 2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lcx8883@sina.com

Abstract: Viviparity (live-bearing) is a reproductive mode that evolves from oviparity through gradual increases in the length of egg retention and thus intrauterine development. Squamate reptiles (lizards, snakes and amphisbaenians) provide a very useful model system for studying the evolutionary transition from oviparity to viviparity and the adaptive significance of this transition, because they exhibit a wide reproductive diversity. Approximately 20% of squamate reptiles are viviparous, and this reproductive mode has evolved far more often in this group of animals than in all other non-mammalian vertebrates combined. The selective forces responsible for evolution of viviparity remain unclear. To date, there are three main hypothesis of evolution of viviparity, cold-climate hypothesis, predictability hypothesis, and maternal manipulation hypothesis. Of these three main hypotheses, the maternal manipulation hypothesis is most widely accepted in scientific community, although empirical studies testing this hypothesis are still limited. Here, we used the Chinese skink *Eumeces chinensis*, a temperate-climate oviparous scincid lizard, as the model system to test the maternal manipulation hypothesis. Thirty-seven gravid females collected from a population in Lishui, Zhejiang province (eastern China) were maintained in the laboratory under three different thermal conditions until oviposition. Twenty-five females were provided with the basking opportunity, with 12 were allowed to bask for 14-h daily (LT treatment), and 13 for 10-h daily (ST treatment). The remaining 12 females were not provided with the basking opportunity (NTR treatment), and their body temperatures simply tracked changes in ambient environment. Females of different treatments did not differ morphologically. Body temperatures selected by females were measured using a UT325 digital thermometer. We measured each female three times, once on each of three consecutive days, beginning at 15:00 and ended within 2 h on each day. Females selected lower body temperatures and thermoregulated more precisely when gravid, and gravid females selected lower body temperatures than did non-gravid females and males. LT and ST females laid eggs earlier than did NTR females. Females maintained under the three thermal regimes did not differ from each other in any reproductive trait examined, including embryonic stage at oviposition. Six eggs randomly selected from each clutch were assigned to one of the following five treatments: in a room where temperatures varied naturally; in a constant-temperature room at 27 °C; in two incubators where temperatures varied from 24—30 °C and 22—32 °C, respectively; in the backyard of the laboratory mimicking natural nests. Incubation temperature (IT) affected incubation length, but maternal thermoregulation (MT) and the IT × MT interaction did not. MT affected the phenotype hatchlings, but IT and the IT × MT interaction did not. Hatchlings from eggs produced by LT females were longer in SVL, abdomen length and head length, and ran faster than those produced by ST females; hatchlings from eggs produced by NTR females had the shortest SVLs, abdomen lengths and head lengths, and performed worst in the racetrack. Other hatchling morphological traits examined did not differ among treatments. Our data support the two main predications from the maternal manipulation hypothesis: (1) gravid females shift their body temperature to provide the optimal thermal conditions for embryos; and (2) offspring phenotypes induced by maternal thermoregulation will enhance offspring fitness.

Key Words: Chinese skink (*Eumeces chinensis*); maternal body temperature; evolution of viviparity; maternal manipulation hypothesis; phenotype

脊椎动物生活史特征与环境因子之间最一致的经验性关联,就是爬行动物的繁殖模式与热体系之间的联系。从进化驱动力的角度探讨爬行动物繁殖模式进化的假说有很多,其中冷气候假说^[1-3],预见性假说^[4]和母体操纵假说^[5]最受关注。这3种假说均认为母体调温行为(孕期母体所处热体系)在有鳞类卵胎生繁殖模式进化过程中起重要作用。一些学者以卵胎生物种为对象研究母体调温与卵胎生进化之间的关系^[6-10],然而多数爬行动物具卵生繁殖模式。分类学和胚胎学的证据表明爬行动物的祖先营卵生繁殖模式,因此在现生许多爬行动物中同时存在卵生和卵胎生两种繁殖模式,表明历史上卵胎生繁殖模式经历了多次进化^[11]。因此,研究替代古生卵生种类的现生卵生爬行动物对了解驱使繁殖模式转变的选择压力非常重要。根据当前受关注最多的母体操纵假说的两个主要预测,孕期母体发生体温漂变,以提供体内胚胎发育的最适热环境,从而增

强后代的适合度^[5,8]。孕期母体修饰调温行为,即母体在孕期会改变选择体温这一现象,在许多爬行动物中已有记载^[8]。一些学者认为母体这种修饰行为是对卵胎生殖模式进化的适应^[8];在繁殖模式进化选择压力和孕期母体的调温行为之间存在因果联系,因为这种被母体特化的热体系十分利于胚胎发育。之前的研究多集中于卵胎生物种,比较而言,卵生物种在产卵前同样能提供体内胚胎发育的最适热环境,至少是在部分胚胎发育阶段。因为在卵生种类中,胚胎发育的前四分之一是在输卵管内完成的^[12],而且热体系在胚胎发育早期对孵出幼体形态的影响要大于后期^[13-14]。因此,在胚胎发育早期,处于孕期的卵生种类可以通过行为调温来调节体内胚胎发育的热体系。综上所述,卵生爬行动物比卵胎生物种更适合用于检测卵胎生进化假说。

以卵生物种为模型动物开展研究支持母体操纵假说的经验性数据非常有限^[5],因为在该假说提出之后,后续的研究多集中于卵胎生种类。本研究提供中国石龙子(*Eumeces chinensis*)怀卵母体不同的调温机会(详细实验设计见材料和方法),所得数据用于检测母体操纵假说的两个主要预测。中国石龙子是中等体型、日行性的卵生石龙子,广泛分布于中国的中部和南部省份^[15]。

1 材料和方法

1.1 动物采集和孕期母体热处理

2011 年 4 月上旬至 5 月上旬于浙江丽水(41°45'N, 107°01'E;海拔约 300 m)采用徒手捕捉或索套法采集 37 条成年雌体中国石龙子(体长 SVL>101 mm),同时捕获 15 条雄体,一并带回南京师范大学两栖爬行动物实验室饲养。动物置于 2.5 m × 1.2 m × 0.6 m(长 × 宽 × 高)的玻璃缸内,缸底铺以 200 mm 厚的细沙和泥土的混合物,夹杂少许小碎石和绿草皮,最大程度的模拟其自然栖息环境。缸的一端悬挂 200 瓦灯泡以提供调温热源,调温时长为 12 L:12 D。夜间提供热源的灯泡关闭后,室内温度降至室温(24±1)℃。饲养期间提供充足的食物[面包虫(黄粉蝶(*Tenebrio molitor*)幼虫,蟋蟀(*Achetus domesticus*)和野生蝗虫],同时提供充足的饮水,并定期在饮水中添加维生素和钙粉,以确保实验个体获得充足营养。

动物在实验室环境下驯化 1 周左右,指触判定母体是否怀卵,随后怀卵母体被随机分至 3 个实验处理组:其中 12 条提供每天 14 h 光照(LT 实验组),另 13 条提供每天 10 h 光照(ST 实验组),余下 12 条置于不能自主调温的饲养缸内(NTR 实验组)。

在第 1 条母体产卵后,每日间隔 4h 检查箱内母体产卵情况,及时收集新生卵并称重。每窝卵随机取 6 枚用于孵化实验(剩余的卵用于其他实验——孵化期内胚胎生长以及物质能量动用)。孵化温度分别为:1=室内波动温度孵化;2=27℃;3=24—30℃;4=22—32℃(3 和 4 孵化处理中,孵化箱内的温度每隔 1d 改变 1 次,即卵分别在 22℃和 24℃孵化 24 h,随后在 32℃和 30℃孵化 24 h,每 2d 循环 1 次直至孵出);5=在实验室后院内模拟石龙子野外巢址孵化。该孵化处理下,胚胎经历的温度具有日变化和月变化(图 1),每天的最大热变异,最高平均温度、最低低温和最高高温分别为 6.3、29.8、28.5、33.2℃。室内波动孵化温度的范围介于模拟巢址温度范围之内(图 1 中的两条水平线分别表示室内波动温度的最高和最低值)。每隔 1d 称量孵化盒,添加必要的水分以补充蒸发的水分和孵化期间卵吸收的水分。将数据记录块(Tinytalk TK-0014, Gemini Pty, Australia)的探头置于孵化盒内的空气中,间隔 1 h 记录每个自然巢址中的温度变化情况,以追踪卵在胚胎发育期间所经历的孵化温度。

母体产卵后,测定其产后体重、体长和尾长。3 种处理下 37 条雌体中共有 28 条母体产发育良好的卵,其余 9 条产未受精的卵,因此这些雌体未纳入统计分析。用窝卵重除以产后母体体重表示相对窝卵重,用窝卵数和母体体长的自然对数的回归剩余值表示相对生育力^[16]。

1.2 怀卵对雌体选择体温的影响

2007 年 4 月中旬采集浙江丽水中国石龙子(11 条怀卵母体、10 条非怀卵母体和 6 条雄性成体(SVL>105 mm)),用于检测孕期内怀卵母体是否有体温漂移现象。该实验所用玻璃缸的条件同前,缸一端悬挂 200 瓦灯泡在箱内形成范围为 18—55℃的热梯度,灯泡开启时长为每天 14 h。从样本组中随机挑选 10 条石龙子,每天 7:00 灯泡开启时从低温端移入动物,用 UT325 数显点温计(上海医药器材公司)测量动物体温。为去除

选择体温的昼夜差异,每天 15:00 开始测量,每次测量在 1h 内结束。每条个体在连续 3 d 被测量 3 次后就不再重复测量该个体。重复测量方差分析 (repeated measures ANOVA) 显示各组 3 次体温测量没有显著差异 (所有 $P>0.05$), 3 次测量的体温的平均值作为石龙子的选择体温。

1.3 孵出幼体表型的测定

第一枚卵破壳后,每日检查孵化盒数次,将破壳后的卵移至单独的 100 mL 大小的玻璃罐中,以确保孵出幼体和卵一一对应。对每一孵出幼体称重并记录其孵出的时间,以此计算卵的孵化期。由于爬行动物的运动表现与体温水平密切相关,在检测幼体运动表现之前,先把幼体置于 30 °C 的恒温箱内半小时以控制其体温在 30 °C 左右。运动表现在长约 1.6 m 的直行跑道上检测,用毛笔刷驱赶幼体,整个过程用松下数码摄像机 NV-DS77 录像,视频用 MGI VideoWave III 软件 (MGI

Software Co., Canada) 读取。幼体的疾跑速是用 25 cm 间距里的最大运动速度表示,最大持续运动距离用幼体在没有停止动作情况下所经历的最长运动距离表示。每条幼体间隔 30 min 休息后再重复检测运动表现,之后将幼体置于 5 °C 培养箱内一段时间,然后测量形态学指标。形态学指标包括:体长、尾长、腹长、头长、头宽、前肢长、后肢长和腹鳞数。所有幼体在结束上述实验后择机放回其原栖息地。

1.4 统计分析

产未受精卵的雌体繁殖数据未被采用;表型测定实验中 4 条幼体拒绝跑动,因此相关数据未被采用。数据用统计软件包 Statistica 5.0 分析。在作进一步统计分析前,用 Kolmogorov-Smirnov 和 Bartlett 方法分别检验数据的正态性和方差均质性。用线性回归、双因子方差分析 (对初始卵重的比较) 和双因子协方差分析 (以初始卵重为协变量,母体热处理和孵化温度为因子) 分析相关数据。Tukey 多重比较检验存在显著差异的不同热处理之间的幼体特征。本文所有统计值用平均值 \pm 标准误表示,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 雌性繁殖

雌体产卵时间为 5 月下旬至 6 月下旬,繁殖期内产单窝卵。28 条母体一共产下 360 枚卵,平均窝卵数为 12.9 (表 1)。新生卵胚胎历期为 30—34 期,3 种母体热处理下所产新生卵的胚胎历期没有显著差异 ($F_{2,21}=0.09$, $P=0.915$)。不同孵化温度下的孵化期有显著差异 ($F_{4,129}=10.67$, $P=0.004$),但母体热处理间没有显著差异 ($F_{2,129}=0.66$, $P=0.520$),母体热处理和孵化温度的交互作用对孵化期也没有显著影响 ($F_{4,129}=1.35$, $P=0.225$)。3 种母体热处理下的所有雌体繁殖特征均无显著差异 (表 1),这些雌体繁殖特征包括:体长、产后体重、窝卵数、窝卵重、平均卵重和相对窝卵重。当把 3 种母体热处理下的数据合并后,发现窝卵数 ($r^2=0.46$, $F_{1,26}=22.20$, $P<0.0001$)、窝卵重 ($r^2=0.37$, $F_{1,26}=15.08$, $P<0.007$) 和母体体长成正相关,但平均卵重与母体体长无显著相关性 ($r^2=0.05$, $F_{1,26}=1.46$, $P=0.239$),平均卵重和相对生育力之间亦无显著相关性 ($r^2=0.05$, $F_{1,26}=1.51$, $P=0.230$)。

2.2 选择体温

怀卵雌体、非怀卵雌体以及雄性成体的选择体温具有显著差异 ($F_{2,24}=36.99$, $P<0.0001$; 表 2)。雄性成体和非怀卵雌体的选择体温高于怀卵雌体的选择体温,雄性成体和非怀卵雌体的选择体温没有显著差异。怀卵雌体、非怀卵雌体和雄性成体选择体温的热变异分别为 0.2、0.3 和 0.6,三者统计上没有显著差异 (所

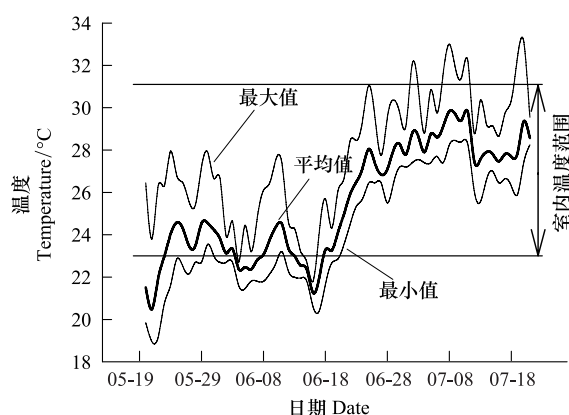


图 1 实验室后院巢址中孵化的中国石龙子 (*Eumeces chinensis*) 卵经历的日最低温,日均温和日最高温的瞬时变化

Fig. 1 Temporal variation in daily minimal, mean and maximal temperatures experienced by *Eumeces chinensis* eggs incubated in the nests built in the backyard of the laboratory

图中两条水平线显示室内波动温度的范围

有 $P>0.05$)。

表 1 3 种热处理下中国石龙子的雌体繁殖特征

Table 1 Reproductive traits of females maintained under three thermal treatments

繁殖特征 Reproductive traits	母体热处理 Maternal thermal treatments			协方差分析结果 Results of ANCOVA
	LT	ST	NTR	
样本数 N	9	13	6	
体长/mm	103.4±1.7	102.8±2.0	101.7±1.0	$F_{2,25}=0.14$,
Snout-vent length	96.8—110.7	88.7—117.7	99.7—105.9	$P=0.869$
产后体重/g	20.8±1.1	20.8±0.8	19.4±0.9	$F_{2,24}=0.53$,
Postpartum body mass	16.6—27.1	13.9—26.7	17.1—23.1	$P=0.595$
窝卵数	13.6±1.6	13.1±1.4	12.0±1.7	$F_{2,24}=0.06$,
Clutch size	5—22	7—25	6—17	$P=0.942$
窝卵重/g	9.35±1.24	9.70±0.85	7.47±1.10	$F_{2,24}=1.04$,
Clutch mass	3.95—16.06	4.63—15.36	4.41—10.53	$P=0.368$
平均卵重/g	0.70±0.03	0.77±0.04	0.67±0.04	$F_{2,25}=1.66$,
Egg mass	0.56—0.80	0.58—1.07	0.52—0.76	$P=0.210$
相对窝卵重	0.44±0.05	0.47±0.03	0.39±0.06	$F_{2,24}=0.58$,
Relative clutch mass	0.22—0.70	0.21—0.66	0.22—0.55	$P=0.569$

数据用平均值±标准误和范围表示;表中给出单因子方差分析(体长)或以雌体体长为协变量(窝卵数,窝卵重和母体产后体重)以及产后体重为协变量(相对窝卵重)的协方差分析的 F 值; $P>0.05$ 表示不显著

表 2 实验室热梯度下怀卵、非怀卵雌体及雄性成体选择体温的描述性统计值

Table 2 Descriptive statistics for body temperatures selected by gravid females, non-gravid females and adult males on the laboratory thermal gradient

类别 Category	样本数 N	平均值 Mean	标准误 SE	范围 Range
怀卵母体 Gravid females	11	28.1	0.2	26.9—29.3
非怀卵母体 Non-gravid females	10	30.9	0.3	29.9—32.2
雄性成体 Adult males	6	31.9	0.6	29.9—33.2

2.3 孵出幼体的表型特征和运动表现

所有被检测的形态学特征与初始卵重呈正相关,所以用经初始卵重矫正后的相关形态学数据来比较孵出幼体的表型特征。以初始卵重为协变量,母体热处理和孵化温度为因子的双因子协方差分析结果显示:孵出幼体的体长、腹长和头部大小(头长和头宽)在 3 个母体热处理间存在显著差异(图 2),其他形态学特征不存在母体热处理间的显著差异;孵化温度以及孵化温度和母体热处理的交互作用对所有的幼体形态学特征均无显著影响(表 3)。疾跑速和最大持续运动距离与所有被检测的 7 个形态学特征均不存在相关性(所有 $P>0.05$),因此用两因子(母体热处理和孵化温度)方差分析进行统计。结果显示孵化温度($F_{4,105}=0.65$, $P=0.631$)以及孵化温度和母体热处理的交互作用($F_{8,105}=1.17$, $P=0.326$)对疾跑速无显著影响;但不同的母体热处理显著影响幼体疾跑速($F_{4,105}=3.99$, $P=0.021$)(图 2;表 3)。最大持续运动距离的结果与疾跑速相似:孵化温度($F_{4,105}=0.94$, $P=0.447$)以及孵化温度和母体热处理的交互作用($F_{8,105}=1.06$, $P=0.399$)对最大持续运动距离无显著影响;但不同的母体热处理显著影响幼体最大持续运动距离($F_{2,105}=3.23$, $P=0.044$)(图 3;表 3)。

3 讨论

本研究以卵生爬行动物为模型,检测 Shine^[5]提出的母体操纵假说。迄今支持该假说的经验性数据还相当匮乏,尤其是来自卵生爬行动物的实验证据。该假说被认为是适用于任何情况下的任何物种:母体在孕期能通过体温调节行为维持自身较为稳定或更可预见的体温,以此提供体内胚胎发育的最适热环境从而达到增强后代适合度(也是母体自身适合度)的目的^[8]。因而该假说近年来广受关注。然而之后的所有相关研究均以卵胎生物种为模型来验证该假说^[8-10],本研究首次采用卵生爬行动物为模型验证该假说。

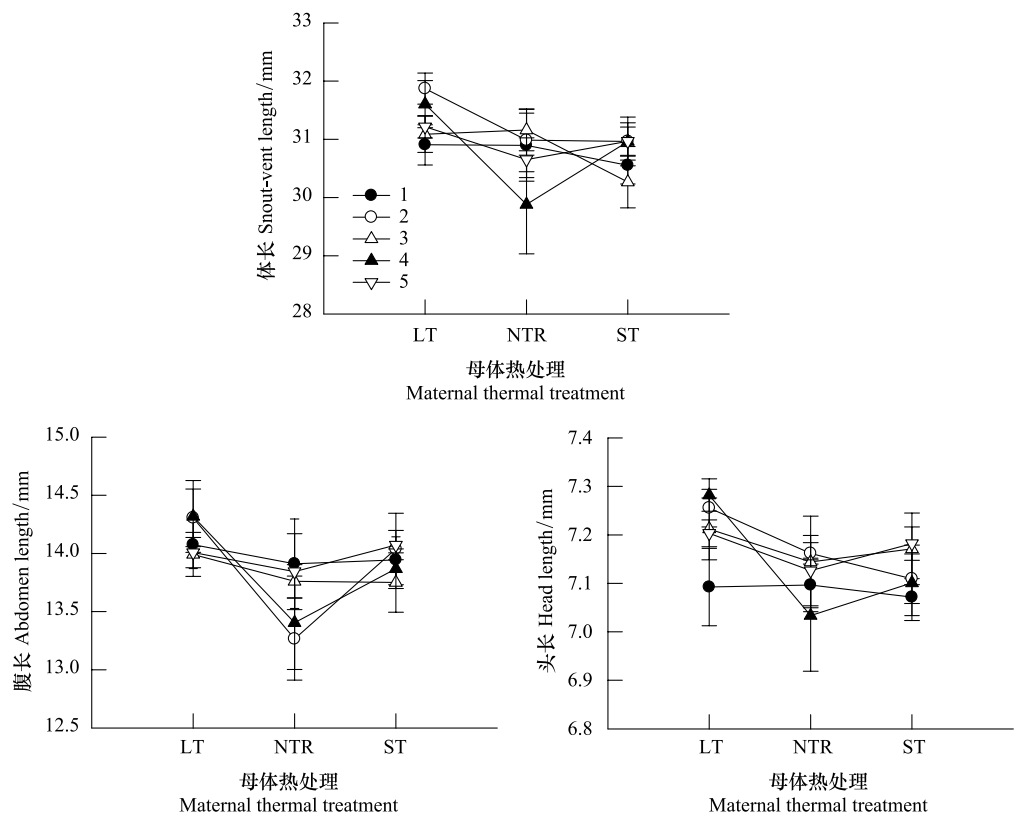


图2 3种母体热处理下所产卵在5个孵化温度下孵出的幼体体长、腹长和头长的平均值(±标准误)

Fig. 2 Mean values (\pm SE) for SVL, head length and head width of hatchling derived from eggs laid by females maintained under three thermal treatments at five incubation temperature

孵化热环境设置如下:1=室内波动温度孵化;2=27℃;3=24—30℃;4=22—32℃(3和4孵化处理中,孵化箱内的温度每隔1d改变1次);5=在实验室后院内模拟石龙子野外巢址孵化

表3 以母体热处理和孵化温度为因子的方差或协方差(以初始卵重为协变量)分析比较孵出幼体的形态学特征和运动表现

Table 3 Two-way ANCOVA (using initial egg mass as the covariate) or ANOVA analysis compared the morphological traits and locomotor performance of hatchling, with maternal treatment and incubation temperature as the factors

变量 Variables	因子效应 Effects		
	母体热处理 Maternal treatment	孵化温度 Incubation temperature	交互作用 MT \times IT Interaction
体长 Snout-vent length	$F_{2,108}=3.80, P<0.025$; LT ^a , ST ^b , NTR ^b	$F_{4,108}=0.62, P=0.649$	$F_{8,108}=0.99, P=0.445$
腹长 Abdomen length	$F_{2,108}=4.06, P<0.020$; LT ^a , ST ^{ab} , NTR ^b	$F_{4,108}=0.22, P=0.926$	$F_{8,108}=0.70, P=0.693$
尾长 Tail length	$F_{2,108}=0.50, P=0.613$	$F_{4,108}=0.49, P=0.742$	$F_{8,108}=1.17, P=0.326$
头长 Head length	$F_{2,108}=3.41, P<0.037$; LT ^a , ST ^b , NTR ^b	$F_{4,108}=0.96, P=0.435$	$F_{8,108}=0.60, P=0.776$
头宽 Head width	$F_{2,108}=2.80, P<0.065$	$F_{4,108}=0.75, P=0.563$	$F_{8,128}=1.09, P=0.379$
前肢长 Fore-limb length	$F_{2,128}=2.03, P=0.137$	$F_{4,108}=1.15, P=0.337$	$F_{8,108}=1.01, P=0.437$
后肢长 Hind-limb length	$F_{2,108}=1.90, P=0.154$	$F_{4,108}=0.93, P=0.448$	$F_{8,128}=0.65, P=0.736$
疾跑速 Sprint Speed	$F_{2,105}=3.99, P=0.021$; LT ^a , ST ^{ab} , NTR ^b	$F_{4,105}=0.65, P=0.631$	$F_{8,105}=1.17, P=0.326$
最大运动距离 Maximal length	$F_{2,105}=3.23, P=0.044$; LT ^{ab} , ST ^a , NTR ^b	$F_{4,105}=0.94, P=0.447$	$F_{8,105}=1.06, P=0.399$

因子效应显著时用经初始卵重(设定初始卵重为0.75g)矫正后的孵出幼体形态学特征进行 Tukey's 多重比较(a>b)

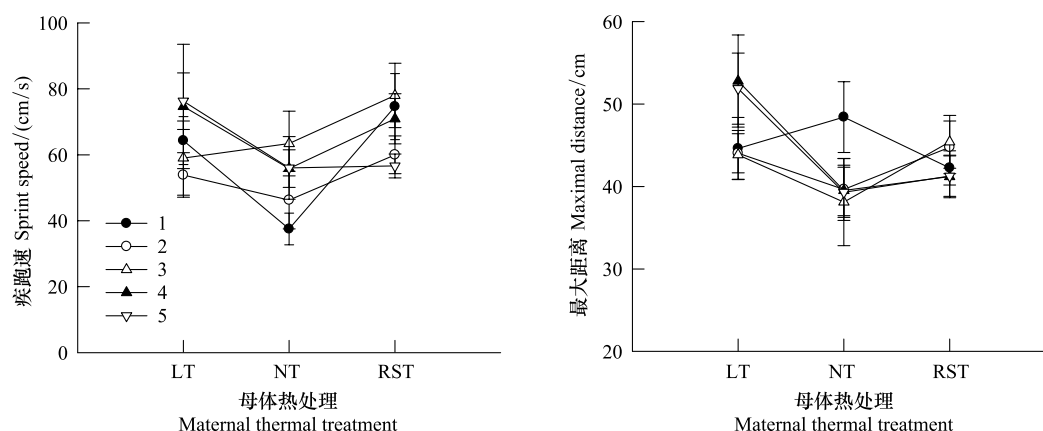


图3 3种母体热处理下所产卵在5种孵化温度下孵出的幼体疾跑速和最大运动距离的平均值(±标准误)

Fig. 3 Mean values (\pm SE) for sprint speed and the maximal distance of hatchling derived from eggs laid by females maintained under three thermal treatments at five incubation temperature

3.1 孕期雌体选择体温发生漂移

爬行动物的热喜好并不是固定不变的特征,因为该特征可以受到很多内在和外在因素的作用^[17]。在有鳞类爬行动物的许多物种中,孕期雌体发生热喜好漂移(向上或向下漂移)^[8, 10, 18-21]。孕期雌体对行为调温和热喜好的修饰作用的产生可能同雌体通过这些修饰能提供体内胚胎发育的最适热环境所带来的利益相关联,而这一点被认为是爬行动物发生卵胎生进化的非常合理的原因^[5, 7]。正如同域分布的但利用更为郁闭生境的印度蜥蜴(*Sphenomorphus indicu*)^[22],中国石龙子孕期雌体的选择体温(28.1℃)低于产后雌体(30.9℃)和雄性成体的选择体温(31.9℃)(表2)。这个结果验证了母体操纵假说的第一个预测:雌体在孕期发生了热喜好漂移现象。在爬行动物中,孵化温度或者孕期母体的体温能影响孵出(或产出)幼体的形态特征和功能表现^[23-25]。而在卵生种类中,孵化期随孵化温度的升高而缩短,但在母体产卵前,母体输卵管卵内胚胎的发育状况决定于母体的选择体温,且热体系在胚胎发育早期对孵出幼体形态的影响要大于胚胎发育后期^[13-14]。本实验室之前对印度蜥蜴(*S. indicu*)^[22]的研究表明,中国石龙子孕期内野外环境的日平均温度,日最高温度以及日最低温度分别为27.9、20.9、36.5℃,所以孕期内母体要选择相对较低的体温以防止高温对体内胚胎的不利影响。通过本实验室之前对中国石龙子的多项研究表明,26至30℃为孵化中国石龙子的适宜温度,24℃孵化温度下,中国石龙子胚胎发育能耗较大,胚胎从卵壳动用的无机物极少,而高温32℃下孵出的幼体头部最小;孵化温度从24到26℃,孵化期平均缩短10 d,从26到30℃,孵化期平均缩短11 d,而当孵化温度从30转到32℃时,孵化期仅仅缩短了1.4d^[26]。中国石龙子这种孵化期长度的热依赖模式表明:雌体在孕期通过调高体温以加速胚胎发育(或者说提前产卵所获得的利益)呈逐渐减小的趋势。因此孕期内母体通过选择体温向下漂移以提供体内胚胎发育的最适热环境,即选择相对较低的体温。

3.2 由母体调温行为诱导的后代表型特征变化

产卵前怀卵雌体的调温时长或是否有调温机会不仅影响中国石龙子雌体的产卵时间,而且影响孵出幼体的形态学特征和运动表现。通常卵滞留在母体输卵管内的时间在胚胎发育整个周期内占据重要的地位^[12],具有较多调温机会的母体可以通过频繁的调温行为以加速体内胚胎发育,促使母体产卵时间提前。本研究中处于长调温和短调温处理下的母体产卵时间要明显早于非调温组处理下的母体,尽管这3种母体热处理下新生卵的胚胎历期没有显著差异。一种可能的解释是:长短调温组下的母体因为比非调温组下母体具有更多的调温机会以提供体内胚胎发育最适的热环境,因此具有较多调温机会的母体产卵时间提前。早期胚胎发育主要涉及组织分化和器官形成,后期则主要涉及胚胎长度的增长和生理上的变化,因此热体系对早期胚胎发育的影响要显著大于胚胎发育后期^[13-14]。本研究中,相对于短调温组和非调温组,长调温组下的幼体不仅具有较大的体长、腹长和头长,而且具有更好的运动表现(疾跑速和最大持续运动距离)(表3,图2,图3)。这是

因为长调温组下的母体具有更多调温机会,从而在更长时间内可以维持自身体温处于最适宜体内胚胎发育的水平,以达到优化后代表型的目的。后代运动表现对于逃避天敌和增强摄食成功率都有重要影响^[27-29]。有文献显示较大的后代要比同物种中较小的个体具有更强的适应自然环境的能力(蛾类^[30];海生无脊椎类^[31-32];节肢动物类^[33];鱼类^[34];和爬行类^[8, 35])。中国石龙子产卵前的怀卵母体调温机会越多,它们产卵后孵化出的幼体表型越好,从而增强了后代的适合度,同时也增强了母体自身的适合度。因此,当前研究所得数据证实了母体操纵假说的另一预测:母体体温漂移所诱导的后代表型变异将增强后代的适合度。

4 结论

本研究以一种卵生爬行动物——中国石龙子为模型,尝试验证母体操纵假说的两个主要预测:雌体在孕期通过体温漂变行为提供体内胚胎发育的最适热环境,而由母体调温行为诱导的后代表型的变异将增强后代的适合度。

致谢:感谢丁国骅和孙燕燕博士对实验给予的帮助。

References:

- [1] Mell R. Preliminary contributions to an ecology of East Asiatic reptiles, especially snakes. *Lingnan Science Journal*, 1929, 8: 187-197.
- [2] Weekes H C. On the distribution, habitat and reproductive habits of certain European and Australian snakes and lizards, with particular regard to their adoption of viviparity. *Proceedings of the Linnaean Society of New South Wales*, 1933, 58: 270-274.
- [3] Sergeev A M. Researches in the viviparity of reptiles. *Moscow Society of Naturalist (Jubilee Issue)*. Moscow Society of Naturalist, 1940: 1-34.
- [4] Tinkle D W, Gibbons J W. The distribution and evolution of viviparity in reptiles. *Miscellaneous Publications of the Museum of Zoology, University of Michigan*, 1977, 154: 1-55.
- [5] Shine R. A new hypothesis for the evolution of viviparity in reptiles. *The American Naturalist*, 1995, 145(5): 809-823.
- [6] Charland M B. Thermal consequences of reptilian viviparity: thermal regulation in gravid and nongravid snakes (*Thamnophis*). *Journal of Herpetology*, 1995, 29(3): 383-390.
- [7] Shine R. Is increased maternal basking an adaptation or a pre-adaptation to viviparity in lizards?. *Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology*, 2006, 305A(6): 524-535.
- [8] Webb J K, Shine R, Christian K A. The adaptive significance of reptilian viviparity in the tropics: testing the maternal manipulation hypothesis. *Evolution*, 2006, 60(1): 115-122.
- [9] 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(3): 1037-1045.
- [10] Li H, Qu Y F, Hu R B, Ji X. Evolution of viviparity in cold-climate lizards: testing the maternal manipulation hypothesis. *Evolutionary Ecology*, 2009, 23(5): 777-790.
- [11] Matthews L H. The evolution of viviparity in vertebrates. *Memoirs of the Society for Endocrinology*, 1955, 4: 129-144.
- [12] Andrews R M. Embryonic development // Deeming D C, ed. *Reptilian Incubation: Environment, Evolution, and Behaviour*. Nottingham: Nottingham University Press, 2004: 75-102.
- [13] Braña F, Ji X. The selective basis for increased egg retention: early incubation temperature determines hatchling phenotype in wall lizards (*Podarcis muralis*). *Biological Journal of the Linnean Society*, 2007, 92(3): 441-447.
- [14] Radder R S, Elphick M J, Warner D A, Pike D A, Shine R. Reproductive modes in lizards: measuring fitness consequences of the duration of uterine retention of eggs. *Functional Ecology*, 2008, 22(2): 332-339.
- [15] Zhao E M, Adler K. *Herpetology of China*. Oxford: Society of the Study of Amphibians and Reptiles, 1993.
- [16] Olsson M, Shine R. The limits to reproductive output: offspring size versus number in the sand lizard (*Lacerta agilis*). *The American Naturalist*, 1997, 149(1): 179-188.
- [17] Rock J, Andrews R M, Cree A. Effects of reproductive condition, season and site on selected temperatures of a viviparous gecko. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2000, 73(3): 344-355.
- [18] Braña F. Shifts in body-temperature and escape behaviour of female *Podarcis muralis* during pregnancy. *Oikos*, 1993, 66(2): 216-222.
- [19] Andrews R M, Rose B R. Evolution of viviparity: constraints on egg retention. *Physiological Zoology*, 1994, 67(4): 1006-1024.
- [20] Mathies T, Andrews R M. Influence of pregnancy on thermal biology of the lizard, *Sceloporus jarrovi*: why do pregnant females exhibit low body temperatures? *Functional Ecology*, 1997, 11(4): 498-507.

- [21] Lourdaïs O, Heulin B, Denardo D F. Thermoregulation during gravidity in the children's python (*Antraesia childreni*): a test of the preadaptation hypothesis for maternal thermophily in snakes. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2008, 93(3): 499-508.
- [22] Ji X, Lin L H, Luo L G, Lu H L, Gao J F, Han J. Gestation temperature affects sexual phenotype, morphology, locomotor performance and growth of neonatal brown forest skinks, *Sphenomorphus indicus*. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2006, 88(3): 453-463.
- [23] Van Damme R, Bauwens D, Braña F, Verheyen R F. Incubation temperature differentially affects hatching time, egg survival and sprint speed in the lizard *Podarcis muralis*. *Herpetologica*, 1992, 48(2): 220-228.
- [24] Burger J. Antipredator behaviour of hatchling snakes: effects of incubation temperature and stimulated predators. *Animal Behaviour*, 1998, 56(3): 547-553.
- [25] Ji X, Braña F. The influence of thermal and hydric environments on embryonic use of energy and nutrients, and hatchling traits, in the wall lizards (*Podarcis muralis*). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 1999, 124(2): 205-213.
- [26] Ji X, Zhang C H. Effects of thermal and hydric environments on incubating eggs, hatching success, and hatchling traits in the Chinese skink (*Eumeces chinensis*). *Acta Zoologica Sinica* 2001, 47(3): 250-259.
- [27] Bauwens D, Garland Jr T, Castilla A M, Van Damme R. Evolution of sprint speed in lacertid lizards: morphological, physiological and behavioral covariation. *Evolution*, 1995, 49(5): 848-863.
- [28] Miles D B, Fitzgerald L A, Snell H L. Morphological correlates of locomotor performance in hatchling *Amblyrhynchus cristatus*. *Oecologia*, 1995, 103(2): 261-264.
- [29] Shine R. Locomotor speeds of gravid lizards: placing 'costs of reproduction' within an ecological context. *Functional Ecology*, 2003, 17(4): 526-533.
- [30] Agosta S J. Selection on offspring size varies within and among families in relation to host nutritional quality. *Evolutionary Ecology*, 2008, 22(1): 71-83.
- [31] Moran A L, Emlet R B. Offspring size and performance in variable environments: field studies on a marine snail. *Ecology*, 2001, 82(6): 1597-1612.
- [32] Marshall D J, Keough M J. Complex life cycles and offspring provisioning in marine invertebrates. *Integrative and Comparative Biology*, 2006, 46(5): 643-651.
- [33] Fox C W, Czesak M E. Evolutionary ecology of progeny size in arthropods. *Annual Review of Entomology*, 2000, 45(1): 341-369.
- [34] Bagenal T B. Relationship between egg size and fry survival in brown trout *Salmo trutta* L. *Journal of Fish Biology*, 1969, 1(4): 349-353.
- [35] Sinervo B. The evolution of maternal investment in lizards: an experimental and comparative analysis of egg size and its effects on offspring performance. *Evolution*, 1990, 44(2): 279-294.

参考文献:

- [26] 计翔, 章朝华. 水热环境对中国石龙子孵化卵、孵化成功率及孵出幼体特征的影响. *动物学报*, 2001, 47(3): 250-259.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元