

秦岭两栖、爬行动物物种多样性海拔分布格局及其解释

郑 智 龚大洁* 孙呈祥 李晓军 李万江

(西北师范大学生命科学学院, 兰州 730070)

摘要: 物种多样性和种域宽度沿环境梯度的分布格局及其成因机制一直是生物地理学和生态学讨论的重要议题。本研究采用多元回归模型和方差分离的方法判断面积、水分和能量、边界限制对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度海拔梯度分布格局的影响。结果表明, 秦岭两栖爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度均呈单峰分布格局, 但峰值分布的海拔段有所差异。形成这种格局是各种因素相互作用的结果, 3种假设的独立解释力较低。水分能量动态假设对两栖、爬行动物物种的丰富度格局有很强的解释能力, 但水分和能量的解释力中有很一部分属于边界限制、面积的协同作用, 在解释两栖动物的海拔分布格局时, 边界限制与水分和能量之间存在较强的共线性, 而在解释爬行动物的海拔分布格局时, 面积与水分和能量之间存在较强的共线性。同时, 本研究采用Stevens法和逐种法对Rapoport法则进行了验证。结果表明, 爬行动物物种种域的海拔梯度格局基本上支持Rapoport法则, 两栖动物很难判断是否支持Rapoport法则。

关键词: 物种丰富度, 气候, 中域效应, 面积, 海拔梯度格局, Rapoport法则, 秦岭

Elevational pattern of amphibian and reptile diversity in Qinling Range and explanation

Zhi Zheng, Dajie Gong*, Chengxiang Sun, Xiaojun Li, Wanjiang Li

College of Life Sciences, Northwestern Normal University, Lanzhou 730070

Abstract: Spatial patterns of species diversity and range size along environmental gradients and their underlying mechanisms have long been controversial issues in biogeography and ecology. The species–area relationship, water-energy dynamic hypothesis and mid-domain effect were used here to explain the elevational patterns of amphibian and reptile species richness and their different faunal components in China's Qinling Range using multivariate regression models and the variance partitioning algorithm. Our results showed unimodal patterns for the elevational distributions of amphibians, reptiles and their faunal components, but the peaks of the patterns differed among groups. The underlying mechanisms shaping the patterns revealed intensive interactions, while the independent explanatory strengths of the three proposed hypotheses (exclude reptile oriental realm) were relatively weak. The water-energy dynamic hypothesis was the most parsimonious explanation of the observed patterns. The majority of water-energy dynamic explanation belonged to interaction of three hypotheses. The interaction between mid-domain effect and water-energy dynamics was larger for amphibians and that between species–area relationship and water-energy dynamic hypothesis was larger for reptiles. The Steven's and cross-species methods were used to examine whether species-specific elevational range sizes of amphibians, reptiles and their different faunal components are applicable to Rapoport's rule. The results showed that reptile range sizes supported Rapoport's rule at the various elevational gradients, while amphibian range sizes were difficult to support Rapoport's rule.

Key words: species richness, climate, mid-domain effect, area, elevational gradient pattern, Rapoport's rule, Qinling Range

收稿日期: 2014-01-07; 接受日期: 2014-08-13

基金项目: 秦岭地区野生动物物种资源评估项目(2012-12)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: gongdj@nwnu.edu.cn

随着全球气候变暖和气候格局改变, 山地动植物多样性也随之发生巨大变化, 研究物种的空间分布格局及其维持机制是探索物种多样性降低、分布区改变和灭绝危机的理论基础(Parmesan, 2006; Gaston *et al.*, 2008)。其中, 物种多样性的海拔梯度格局及其成因机制是生物多样性保护研究的重要组成部分(Vetaas & Grytnes, 2002), 可为研究人员和保护部门确定优先保护顺序和制定保护计划提供参考(Hunter & Yonzon, 1993)。Orme等(2005)研究表明, 生物多样性热点地区、特有种、受威胁种没有分布在相同的地理区域, 因此保护物种多样性不仅要重视生物多样性热点地区, 而且要考虑不同物种的空间分布规律。海拔梯度综合了现代气候(例如: 温度、降雨、大气成分、光照等)因子的影响, 其中温度随海拔梯度的变化速率比在纬度梯度上快1,000倍, 因而海拔梯度成为生态学家的重要研究对象(Barry, 2008)。McCain和Grytnes(2010)认为, 物种丰富度的海拔分布格局主要有4种, 即单调递减格局、驼峰格局、先平台后递减、单峰分布格局。在脊椎动物类群中, 4种格局分别占26%、14%、15%和45%, 其中单峰分布格局最为普遍, 但其成因尚未达成一致的观点。

人们提出了各种假设解释物种多样性的海拔分布格局。其中, 种一面积关系、水分能量动态假设、中域效应应用较为普遍(池秀莲和唐志尧, 2011; 李巧燕和王襄平, 2013)。水分能量动态假设(water-energy dynamic hypothesis, WED)认为, 物种多样性的地理分布格局是由水分和能量共同决定, 水分调节生物体对能量的利用过程(O'Brien, 1993, 1998)。大量研究表明, 水分和能量是解释物种多样性地理格局的重要环境因子(Hawkins *et al.*, 2003; Kreft & Jetz, 2007; de Oliveira & Diniz-Filho, 2010)。相对其他脊椎动物类群, 两栖爬行动物的地理分布更容易受水分和能量的限制。其次, 取样面积也是影响物种多样性地理分布格局的重要因子。种一面积关系(species-area relationship, SAR)解释物种多样性随取样面积增加而增加的机制, 同时, 也反映了物种的空间周转率(Qiao *et al.*, 2012)。随取样面积的增加, 生境异质性和一定面积内获得的能量资源也增加, 从而孕育了更多的物种(Fraser & Currie, 1996; Báldi, 2008)。中域效应模型(mid-domain effect, MDE)(也称边界效应)是基于物种即使在没有任何

环境条件的限制下, 由于受物种分布边界的限制, 物种分布呈两端低中间高的钟形分布曲线(Colwell *et al.*, 2004)。自从中域效应提出之后, 边界限制是否对物种地理分布格局构成限制一直存在广泛的争议(Hawkins *et al.*, 2005; Currie & Kerr, 2008)。最近有研究表明, 边界限制和环境因子结合更能合理解释物种多样性的地理格局(Grytnes & Beaman, 2006; Wang & Fang, 2012)。

Rapoport法则最初是物种分布的纬度位置与纬度分布宽度的假设(Stevens, 1989)。Stevens(1992)利用8份数据(4份木本植物、1份昆虫、1份两栖爬行动物、2份鸟类)研究发现, 物种的平均海拔分布宽度随海拔升高呈线性上升趋势, 从而提出海拔Rapoport法则(Elevational Rapoport Rule, ERR)。Ruggiero和Werekraut(2007)通过元分析发现, Rapoport法则仅适用于北半球欧亚大陆; 物种的平均海拔分布宽度的算法和生物地理因素会影响Rapoport法则的支持程度, 而生态和空间尺度对Rapoport法则并无显著影响。两栖、爬行动物对环境因子有较敏感的反应, 其分布格局更适合用来验证Rapoport法则(Gouveia *et al.*, 2013)。由于全球生态和气候的变化(栖息地丧失、病原菌入侵、全球变暖和紫外线辐射增强等), 全球32.5%(1,856种)的两栖动物处于受威胁状态, 至少有43.2%(2,468种)的两栖动物种群数量已呈下降趋势(Stuart *et al.*, 2004)。与全球平均水平相比, 中国两栖动物受威胁水平较低(27.3%, 100种), 但在旧大陆的国家中, 中国的两栖动物实际上是除印度外受威胁百分比最高的(谢锋等, 2006)。Cooper等(2008)对527种蛙类地理分布区的研究表明, 大多数受威胁蛙类物种往往有较小的地理分布区和体形。因此研究物种种域(即物种的分布范围)对预测物种的未来分布格局变化具有极其重要的价值(Parmesan, 2006)。

秦岭是我国亚热带和暖温带的分界线, 也是中国动物地理区划中古北界和东洋界的分界线(张荣祖, 2011), 山体高大, 动植物垂直分布明显, 因此成为验证海拔Rapoport法则的理想区域。本文利用秦岭两栖、爬行动物物种的海拔分布数据, 分析物种多样性的海拔格局及其形成机制; 验证3种物种多样性地理格局的假设在秦岭山脉海拔梯度上的适用性; 检验该地区两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种种域是否支持海拔Rapoport 法则。

1 方法

1.1 研究区域概况

秦岭其区域有广义和狭义区分。广义的秦岭西起昆仑,中经陇南、陕南,东至豫、鄂、皖一大别山以及蚌埠附近的张八岭,耸立于洮河和渭河以南,白龙江以北。狭义秦岭指的是嘉陵江上游至伏牛山以西,本文中的秦岭指狭义秦岭(陕西省动物研究所等, 1987)。秦岭山体西高东低,主干位于陕西省境内,海拔2,500–3,000 m,山势北陡南缓,主峰太白山3,767 m。秦岭北部是曾经历多次造山运动的宽大纬向褶皱山地,向东延伸是桐柏山和大别山,南部为大巴山。南襄盆地是秦岭褶皱带内所形成的最大内陆构造盆地(中国科学院中国自然地理编委会, 1980)。

秦岭山地垂直气候明显,中山带以下气候四季分明,2,000 m以上的中高山带冬季寒冷,春、夏、秋三季不分明;年均温随海拔的升高呈线性递减,冬季温度和年均温南坡比北坡高,从山麓到海拔2,000 m,南北坡温度基本相同,年均温北坡的垂直递减率为 $0.44^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,南坡的垂直递减率为 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。降雨主要集中在夏季和初秋,年降雨量南坡高于北坡,特别是海拔1,000 m以下,南坡高出北坡100–200 mm,海拔1,000–2,000 m之间则高出50–100 mm。相对湿度南坡大于北坡,夏季相差8–9%,冬季相差2–5%,年平均相差4–6%。日照时数北坡比南坡多300 h(山地气候文集编委会, 1984)。

秦岭植被由于受气候、土壤垂直分布的影响,垂直分布更明显。海拔2,200 m以下为落叶阔叶林带;2,200–2,600 m为针阔叶混交林带;2,400–3,000 m为常绿针叶林带;2,700–3,400 m为落叶针叶林带;3,300–3,765 m为高山灌木草甸带(朱志诚, 1991)。

1.2 数据来源与处理

物种的分布数据主要来自Stejneger(1925)、Pope(1935)、胡淑琴和赵尔宓(1966)、方荣盛和宋鸣涛(1981)、宋鸣涛和方荣盛(1982)、方荣盛和王廷正(1983)、原洪和黄正发(1985)、原洪(1983, 1985)、方荣盛(1985)、宋鸣涛(1985, 1986, 1987a, b)、姚崇勇和张绳祖(1989)、李成等(2000)、江建平(2006)、陈晓虹和江建平(2004)、陈晓虹等(2007)、陈晓虹等(2009)、夏中荣等(2006)、马勇等(2006)、张琼等(2007)、龚大洁等(2008)、Yang等(2011)、巩会生等

(2012)(文献资料详见附录1)。

另外,2012–2013年,笔者6次到秦岭山脉实地调查,在秦岭山脉海拔400–3,000 m之间,沿海拔梯度每隔100 m设置1个样区,共布设10 km × 10 km样区24个,以样区的中心海拔为标准,在每个样区内随机选取10个20 m × 20 m的样方和10条8 km长的样带,样方一般布设在离水源较近的区域,样线宽为100 m。分别在样方内和样带内观测记录出现的两栖爬行动物的种类和海拔分布信息。记录的两栖动物种类鉴定参考《中国两栖动物及其分布彩色图鉴》(费梁等, 2012),爬行动物龟鳖和蜥蜴种类鉴定参考《中国动物志》(张孟闻等, 1998; 赵尔宓等, 1999),蛇类种类鉴定参考《中国蛇类》(赵尔宓, 2006)。调查分别在2012年4–9月,2013年的4–9月完成。

结合作者调查和文献资料的相关信息,确定每个物种分布的海拔上下限,并假设物种在上下限之间都有分布。建立秦岭山地两栖、爬行动物海拔分布范围的物种数据库(附表1)。分析两栖、爬行动物总物种多样性沿海拔梯度的分布格局,根据张荣祖《中国动物地理》(2011)将两栖和爬行动物划分为东洋界、古北界和广布种3种区系成分。由于古北界两栖动物物种较少,故不作专门分析。

1.3 数据分析

1.3.1 物种丰富度海拔分布格局分析

因为秦岭两栖、爬行动物分别分布在140–2,800 m和400–2,800 m的海拔段,所以我们将秦岭100–2,800 m的海拔按照200 m的间隔划分成11个海拔段(例如:100–299 m、300–499 m)。统计每个海拔段内的物种数。

两栖爬行动物物种多样性的测度分别采用 γ 多样性和 β 多样性。 γ 多样性采用物种丰富度即每个海拔段物种的数目表示; β 多样性采用Cody指数(方精云等, 2004)表示,其计算公式为:

$$\beta_r = [g(H) + l(H)]/2 \quad (1)$$

其中 β_r 为Cody指数, $g(H)$ 为沿海拔梯度 H 增加的物种数, $l(H)$ 为沿海拔梯度 H 减少的物种数。在本研究中, $g(H)$ 为物种分布上限落在该海拔段的物种数,即在该海拔段到达分布上限的物种数,而 $l(H)$ 则为物种下限落在该海拔段的物种数,即在该海拔到达分布下限的物种数。

1.3.2 物种多样性格局的解释

本研究采用水分能量动态假设、种–面积关系、

中域效应模型解释秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分物种丰富度的海拔梯度格局。

(1) 水分能量动态假设。该假说认为物种丰富度与水分呈线性正相关, 与能量之间呈二次幂函数关系(O'Brien, 1993, 1998)。本研究采用潜在蒸散量和年均降水量来验证WED在对秦岭山脉的适用性。使用 AET calculator 1.0(www.geography.uoregon.edu/gavin/software.html)(2007 Revision)计算潜在蒸散量(PET), 该程序是利用校正后的Thornthwaite方法计算年气候水分平衡, 包含3个变量, 即纬度、月均温、月降雨量, 根据3个变量计算潜在蒸散量(PET)和实际蒸散量(AET)。

(2) 种-面积关系。该假说认为物种多样性随栖息地面积的增加成幂函数增长关系(Triantis *et al.*, 2003)。本文采用对数转化后的幂函数方程量化了面积对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度海拔格局的影响(池秀莲和唐志尧, 2011; 李巧燕和王襄平, 2013)。

(3) 中域效应。该假说认为物种丰富度受分布边界限制的影响, 呈两边低、中间高的单峰分布格局(Colwell *et al.*, 2004)。本研究将秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种分布宽度为模拟区域, 物种数作为不同的随机抽样样本量, 采用RangeModel程序中的模型5(Empirical Frequency Distribution, Random Midpoint, 经验分布宽度模型)模拟秦岭两栖、爬行及其不同区系成分的物种丰富度格局(Colwell, 2008; 王襄平等, 2009)。

本文气候数据来自世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org>) 1 km×1 km的栅格数据, 用研究区的数字地图从美国地质调查局(USGS)数据高程模型(DEM)数据中提取研究区域的DEM, 然后利用研究区DEM提取每200 m海拔段的气候数据。数据包括研究区每200 m的海拔段的面积、月均温和月降雨量。

以上环境数据的获取和每200 m海拔段的面积的计算都在ArcGIS 10.0中完成。DEM数据的分辨率为90 m×90 m 的栅格数据。

同时, 采用方差分离(variable partition)和回归分析的方法判断SAR、WED、MDE对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分物种丰富度海拔格局的相对作用和交互作用(Heikkinen *et al.*, 2005; 池秀莲和唐志尧, 2011)。方差分离在R程序Vegan程序

包Varpart程序中进行。最后, 采用回归分析和池赤信息标准(Akaike Information Criterion, AIC)统计量筛选最优回归模型。

所有统计分析均在R 3.03(R development Core Team, 2013)中完成。

1.3.3 海拔Rapoport法则的验证

本文采用Stevens法(Stevens, 1989)和逐种法(Letcher & Harvey, 1994)对秦岭两栖、爬行动物物种在海拔上分布宽度是否符合Rapoport法则进行了验证, 同时描述秦岭两栖、爬行动物物种种域与其海拔中点的位置关系。Stevens法以每200 m分布的所有物种的平均种域与其海拔中点的线性回归模型的斜率判断是否支持Rapoport法则, 而逐种法是每个物种的种域与其中点作散点图, 再用线性回归模型的斜率正负作出判断, 若为正值, 即支持Rapoport法则; 反之, 则不支持Rapoport法则。

一般而言, 水分和温度限制两栖、爬行动物的地理分布格局(Vitt & Caldwell, 2009)。因此, 本研究尝试采用了每200 m的海拔段两栖、爬行动物的平均种域分别与年降水量和年温度的线性回归解释两栖、爬行动物物种种域海拔梯度格局。

2 结果

2.1 物种多样性的海拔分布格局

秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度具有相似的海拔分布格局(两栖动物广布种除外), 即单峰分布格局, 但峰值出现的海拔段有所差异: 两栖动物所有种和东洋界物种峰值都分布在中海拔1,100–1,300 m之间(图1A, B); 爬行动物及其不同区系物种丰富度峰值都分布在800–1,000 m的低海拔(图2A, B, C, D)。两栖动物广布种丰富度呈双峰分布格局, 峰值分别出现在700–900 m和1,600–2,000 m的海拔段(图1C)。

两栖动物Cody指数在中海拔以下波动较大, 峰值分布在1,500–1,700 m之间(图1D), 但爬行动物Cody指数呈降—升—降的趋势, 说明爬行动物物种多样性在海拔900–1,100 m和1,900–2,100 m出现两次过渡, 但第一次物种更替量较小, 第二次更替量较大(图2E)。

2.2 不同假设对物种丰富度分布格局的解释

表1显示3种假设对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度海拔分布变异的单独解

释力。其中WED解释力最强(表1), 在81.94–98.48%之间, 且统计极显著(表1)。

MDE对两栖动物及其不同区系成分具有较强的解释力, 其单独解释力在81.3–85.8%之间, 而对爬行动物及其不同区系成分的解释力较弱(表1)。

SAR对爬行动物及其不同区系成分的解释力较低, 但对两栖动物及其不同区系成分的解释力较高(47.50–83.65%), 其中对两栖动物东洋界区系成分的解释力最高(表1)。

最优回归模型筛选结果表明, 环境变量潜在蒸散量(PET)或 PET^2 进入6个最优模型, 年均降水量(PAN)进入5个最优模型(表2), 表明水分和能量环境因子在秦岭两栖、爬行动物物种丰富度分布海拔格局的形成过程中发挥了重要作用。同时, 水分指标 PAN 进入了两栖动物所有最优模型, 能量指标 PET 或 PET^2 进入了爬行动物所有最优模型(表2), 说明这两类动物对水分和能量环境因子的不同需求。

与WED和MDE相比, SAR对秦岭两栖动物及其不同区系成分的物种丰富度分布变异的解释力相对较弱(除东洋界)(表1), 但面积因子进入3个模型中的2个(表2)。与此相反, 在表1中有较强解释力

的MDE预测的物种丰富度(PR)仅进入了1个模型(表2)。MDE对爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度格局的单独解释力较弱, 但MDE预测的物种丰富度(PR)进入所有的最优模型(表2)。这一结果说明, 面积和几何边界限制分别是影响秦岭两栖和爬行动物物种丰富度海拔分布格局的辅助因子, 主要通过与其他环境因子(比如: 水分、能量)组合发挥作用, 这一点也得到方差分离的证实(图3)。

图3显示了采用方差分离分析面积、水分和能量、边界限制对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度分布变异的独立作用和协同作用。结果表明, WED对爬行动物东洋界的独立作用最强(70.0%)(图3爬行动物东洋界c组分), 爬行动物所有种次之(52.5%)(图3爬行动物c组分)。大多数都表现两两之间协同作用的结果, 其中MDE和WED对爬行动物古北界的协同作用较强(图3古北界e组分)。

上述结果表明WED对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度格局的形成解释力最大。

2.3 Rapoport法则的验证

Stevens方法和逐种法对两栖动物的所有种、东洋界、广布种物种种域的验证结果表明, 物种种域

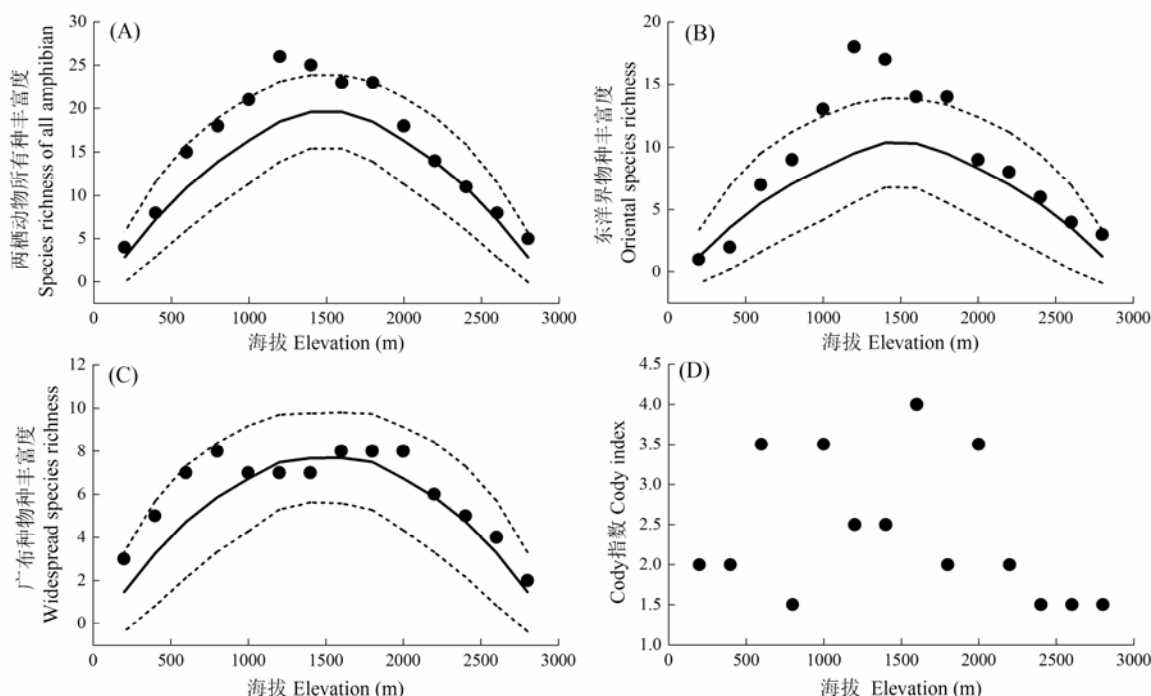


图1 两栖动物及其不同区系成分的物种多样性海拔分布格局。实心点表示实际的物种丰富度, 实线为中域效应模型预测的物种丰富度, 虚线表示模型预测的95%置信区间。

Fig. 1 Elevational patterns of species diversity of amphibians and different faunal components. Dot represents observed richness; solid line represents the predicted richness by mid-domain effect model, while dashed lines represent the 95% confident intervals of predicted richness.

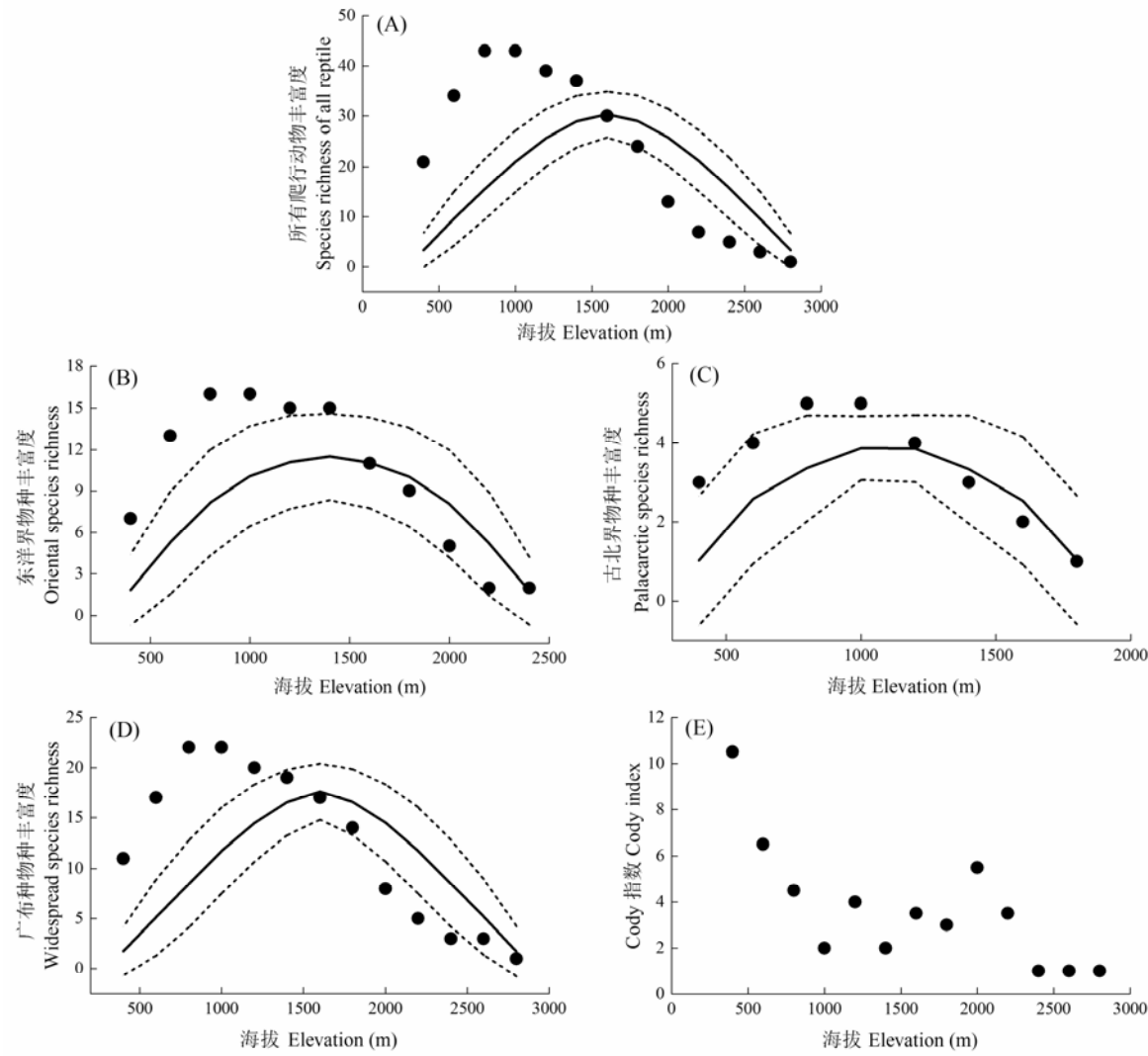


图2 爬行动物及其不同区系成分的物种多样性海拔分布格局。实心点表示实际的物种丰富度，实线为中域效应模型预测的物种丰富度，虚线表示模型预测的95%置信区间。
Fig. 2 Elevational distribution patterns of species diversity of reptiles and different faunal components. Dot represents observed richness; solid line represents the predicted richness by mid-domain effect model, while dashed lines represent the 95% confident intervals of predicted richness.

表1 不同假设对秦岭两栖、爬行动物物种多样性海拔梯度格局的解释百分率(%)
Table 1 Percentage of variations explained by different hypotheses for the elevational species diversity patterns of amphibians and reptiles in the Qinling Range

类群 Group	种-面积关系 Species-area relationship (SAR)	水分-能量假设 Water-energy dynamics (WED)	中域效应假设 Mid-domain effect (MDE)
两栖动物 Amphibian	74.56***	94.59***	85.76***
东洋界 Oriental	83.65***	81.94***	81.3***
广布种 Widespread	47.50**	87.8***	84.65***
爬行动物 Reptiles	43.47**	97.86***	21.49
东洋界 Oriental	18.34	91.44***	34.14
广布种 Widespread	46.66**	95.35***	23.22
古北界 Palaeartic	0.001	98.48***	41.39

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$.

表2 秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度与不同因子的最优线性模型
Table 2 Linear regression models for the elevational patterns of amphibians, reptiles, their different faunal components and different factors in the Qinling Range.

丰富度 Richness	变量 Variables	AIC	模型解释力 Model explanation (R^2 , %)
两栖动物 Amphibian	Area, PET, PET ² , PAN	-98.12	99.05
东洋界 Oriental	Area, PR, PET, PET ² , PAN	-72.52	96.99
广布种 Widespread	PR, PAN	-84.55	94.08
爬行动物 Reptile	Area, PR, PET, PET ²	-80.82	99.44
东洋界 Oriental	Area, PR, PET, PET ² , PAN	-61.12	97.55
古北界 Palaearctic	Area, PR, PET, PAN	-57.67	98.98
广布种 Widespread	Area, PR, PET, PET ²	-69.34	97.98

PET: 潜在蒸散量; PAN: 年降雨量; PR: 中域效应预测的物种丰富度.
PET, potential evapotranspiration; PAN, mean annual precipitation; PR, the species richness of mid-domain effect prediction.

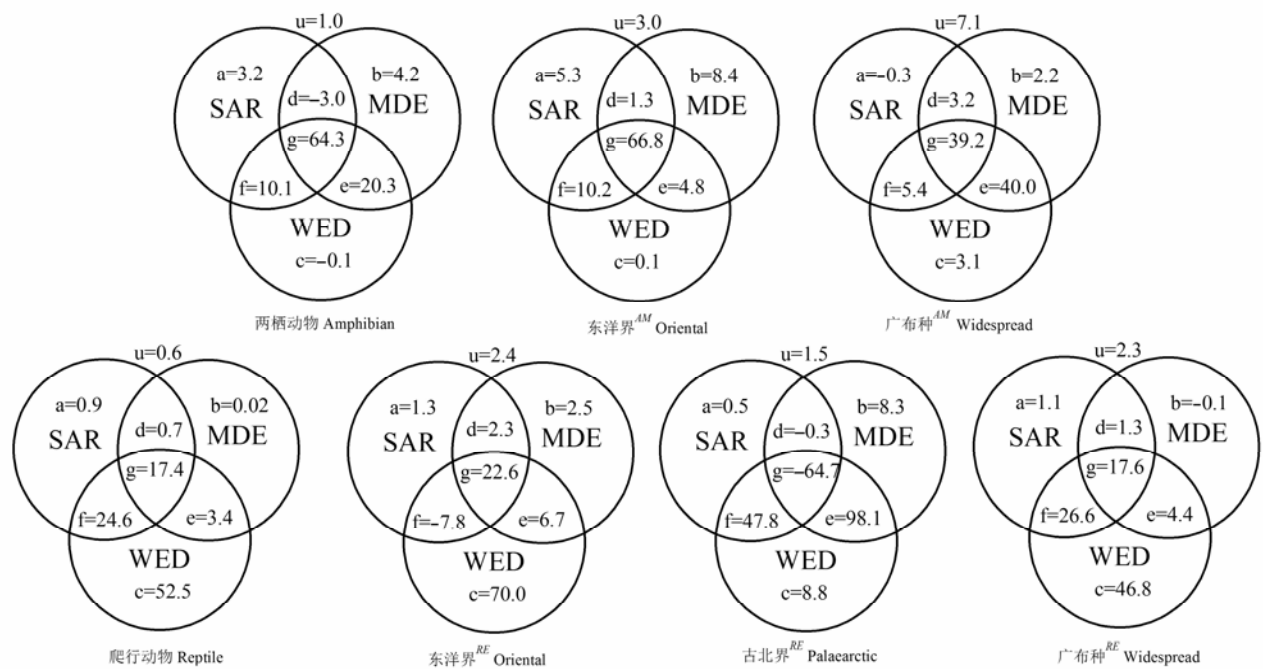


图3 不同环境因子对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度海拔梯度格局的影响(以变异解释百分率表示)。a、b、c分别为SAR、MDE、WED的独立作用; d、e、f、g分别表示三种假设之间的交互作用; u表示三种变量未解释量; ^{AM}为两栖动物不同区系成分; ^{RE}为爬行动物不同区系成分。
Fig. 3 The variation partitioning for the effects of area, water-energy and mid-domain effect on the richness of amphibians, reptiles and their different faunal components in Qinling Range, in terms of the percentage of sum of variances explained. The components a, b and c are the pure effects of area, water-energy, mid-domain effect, while d, e, f and g are the interaction between them. u is an unexplained component of three variables. ^{AM} represents different fauna components for amphibians, and ^{RE} represents different faunal components for reptiles.

与海拔的相关性很小(决定系数 R^2), 统计不显著($P > 0.05$)(图4), 很难判断是否支持Rapoport法则。环境因子年均降雨量(PAN)和年均温(MAT)与单位海拔内物种的平均种域的线性回归模型表明, 年降雨量与两栖动物物种种域大小相关性较强, 而与年均温相关性较小(表3)。

对爬行动物所有种及其不同区系成分的物种种域验证结果表明, 爬行动物所有种及其不同区系成分的种域与海拔中点正相关, 即支持Rapoport法则(图5)。线性回归分析表明, 爬行动物及其不同区系成分物种种域大小与年均温(MAT)相关性最强, 而与年降雨量(PAN)相关性较小(表3)。

表3 秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分物种种域大小与环境因子的线性回归模型
Table 3 Linear regression models for the amphibians, reptiles, their different faunal component species range size and different factors in the Qinling Range.

物种种域 Species range	模型 Model	模型解释力 Model explanation (R^2 , %)	P
两栖动物 Amphibian	$R = -2.86 PAN + 3,459.22$ $R = 15.64 MAT + 1,169.32$	61.64 4.35	5.33×10^{-4} 0.23
东洋界 Oriental	$R = -3.13 PAN + 3,342.92$ $R = 18.61 MAT + 823.87$	66.83 7.85	2.17×10^{-4} 0.17
广布种 Widespread	$R = 15.99 PAN - 8,215.62$ $R = 32.74 MAT + 3,067.28$	68.52 1.8	1.57×10^{-4} 0.65
爬行动物 Reptile	$R = -1.88 PAN + 2,714.46$ $R = -67.81 MAT + 2,137.26$	5.4 81.6	0.22 1.42×10^{-5}
东洋界 Oriental	$R = 0.25 PAN + 850.63$ $R = -16.46 MAT + 1,249.15$	0.6 10.25	0.82 0.34
古北界 Palaearctic	$R = 1.19 PAN + 191.52$ $R = -62.29 MAT + 1,968.37$	12.71 53.34	0.38 0.02
广布种 Widespread	$R = 1.4 PAN + 2,480.54$ $R = -65.11 MAT + 2,224.88$	0.47 90.57	0.33 3.47×10^{-7}

R: 物种种域; PAN: 降雨量; MAT: 年均温
R, species range; PAN, mean annual rainfall; MAT, mean annual temperature.

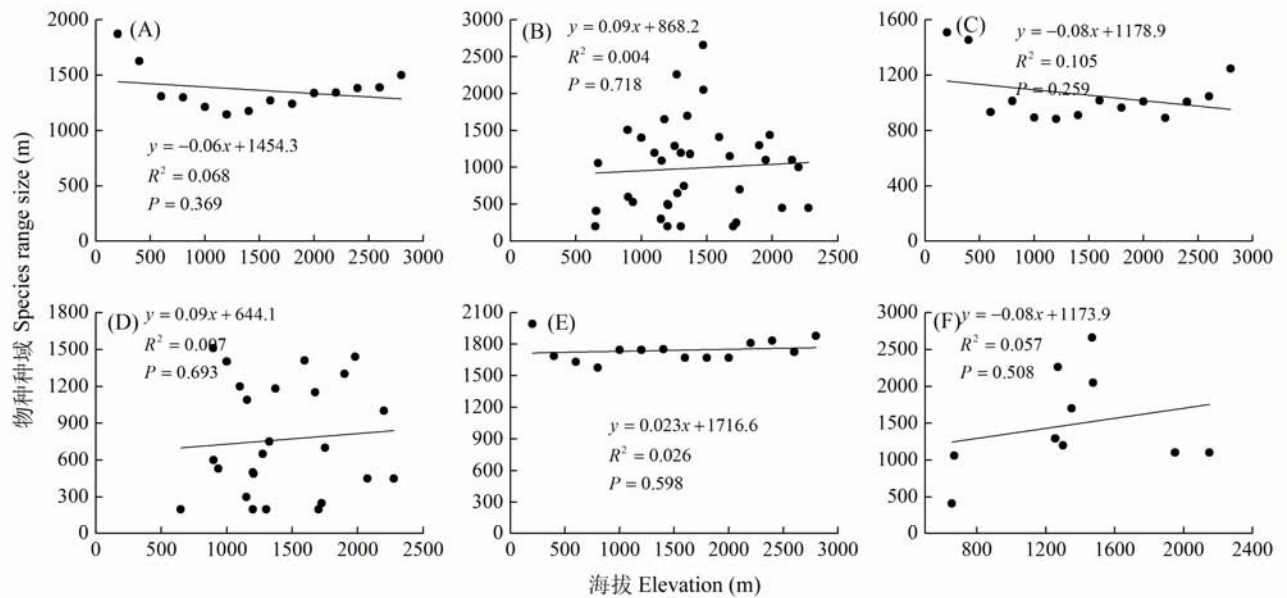


图4 两栖动物种域海拔分布的Rapoport法则验证。(A)所有种Steven方法;(B)所有种逐种法;(C)东洋界物种Steven方法;(D)东洋界物种逐种法;(E)广布种Steven方法;(F)广布种逐种法。
Fig. 4 Test of Rapoport's rule for amphibian range along the elevational gradient. (A) Steven's method for amphibians; (B) Cross-species method for amphibian; (C) Steven's method for oriental; (D) Cross-species method for oriental; (E) Steven's method for widespread; (F) Cross-species method for widespread

3 讨论

3.1 秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分物种丰富度的海拔梯度格局及其解释

物种丰富度沿环境梯度的变化格局及其成因机制一直是生态学研究中的重要议题(Wang *et al.*, 2007)。关于物种丰富度大尺度地理格局的研究主要集中在两个方面,即不同格局的描述和形成其格局

的解释。本研究通过对秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度的海拔梯度格局的研究结果表明,除两栖动物广布种外,均呈单峰分布格局,但峰值分布的海拔段有所差异,两栖动物物种丰富度峰值接近中海拔段,爬行动物则在低海拔段。我们的研究结果支持Rahbek(1995)、McCain和Grytnes(2010)的观点,即单峰分布格局最为普遍。秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富

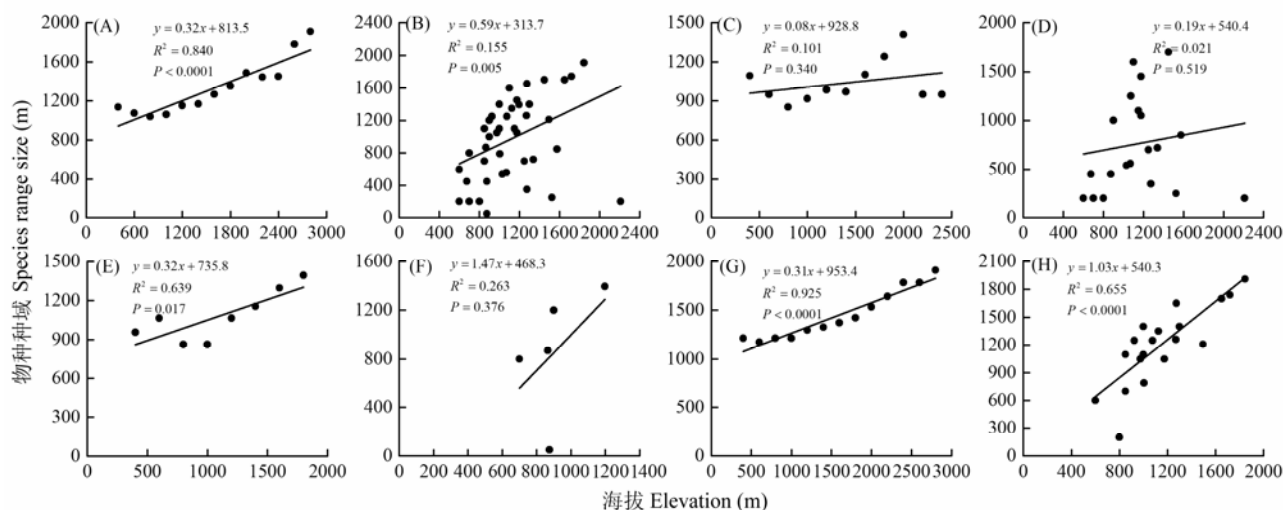


图5 爬行动物种域海拔分布的Rapoport法则验证。(A)所有种Steven's方法;(B)所有种逐种法;(C)东洋界物种Steven方法;(D)东洋界物种逐种法;(E)古北界物种Steven方法;(F)古北界物种逐种法;(G)广布种Steven方法;(H)广布种逐种法

Fig. 5 Test of Rapoport's rule for reptile range along the elevational gradients. (A) Steven's method for reptiles; (B) Cross-species method for reptiles; (C) Steven's method for oriental; (D) Cross-species method for oriental; (E) Steven's method for Palaearctic; (F) Cross-species method for Palaearctic (G) Steven's method for widespread; (H) Cross-species method for widespread

度海拔梯度格局与秦岭地区太白山、牛背梁植物物种丰富度海拔梯度格局相一致(唐志尧和柯金虎, 2004; 池秀莲和唐志尧, 2011)。另外, 横断山脉蛙类、蜥蜴类、蛇类的海拔分布及其棘蛙在其整个分布区的海拔分布都为单峰分布格局(Fu *et al.*, 2006, 2007; Hu *et al.*, 2011)。

物种丰富度地理分布格局的形成是由各种因素相互作用的结果(Gaston, 2000)。本研究利用3种假设解释秦岭两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度的海拔梯度格局。3种假设的总解释力都在92.9%以上, 说明我们选择这3种假设进行解释是可行的。

3种不同假设中, WED对两栖、爬行动物及其不同区系成分的物种丰富度格局的解释力最强, 其主要表现为: (1)测量水分能量动态平衡的指标PET进入最优回归模型中的6个, 水分PAN进入5个(表2); (2)3种假设中, WED解释了物种丰富度变异的81.9%以上(表1); (3)方差分离结果表明, 与SAR和MDE相比, WED除对两栖动物所有种和东洋界区系成分单独的解释力相对较低外, 对其他的解释力最高(图3)。

虽然面积对秦岭两栖、爬行动物物种丰富度格局的变异解释力较弱(表1), 但在7个多元回归模型中进入5个(表2), 说明面积与其他环境因子组合在

一起产生影响, 因此, 面积是补充因子。李成等(2000)对甘肃陇南地区两栖、爬行动物的调查表明其在小区域内分布并不重叠。同时, Fu等(2006)对横断山脉蛙类的研究结果表明, 面积对蛙类物种的解释力相当弱。但是McCain (2010)采用SAR、WED、MDE解释全球爬行动物物种丰富度海拔分布格局时发现: 面积对于全球爬行动物物种丰富度海拔格局的影响仅次于水分和能量。

MDE单独解释秦岭两栖动物物种丰富度的海拔格局时解释力较高, 但对爬行动物的解释力较弱(表1), 进入5个最优回归模型(表2)。在物种丰富度地理格局形成机制的解释的变量或模型选择中, MDE作为对其他环境因子解释的补充变量(Colwell *et al.*, 2004)。

本研究采用回归分析和方差分离的方法探索了SAR、MDE、WED对秦岭两栖、爬行动物物种丰富度海拔分布变异的解释力, 认为采用方差分离的方法能较好地分离每种假设或影响因子对物种丰富度变异的单独贡献及其各种环境因子共线性, 是量化影响物种丰富度变异的重要统计学方法。同时, 结合最优回归模型能较好地解释物种的地理分布格局的形成机制。

以Cody指数测度的物种 β 多样性反映了物种多样性在整个海拔上的更替量(唐志尧和方精云,

2004)。一些研究表明,植物物种多样性的Cody指数呈两头高中间低的海拔梯度分布格局(唐志尧和方精云, 2004),其原因可能与土壤、栖息地异质性、人为干扰有关。唐志尧和柯金虎(2004)对秦岭牛背梁植物的海拔梯度格局的研究也证明了这一点。本研究结果表明,秦岭两栖动物Cody指数近似单峰分布格局,而爬行动物呈降—升—降的海拔分布格局,同时,本研究试图用面积、降雨量和温度等环境指标去量化其形成机制,但是发现与这些指标相关性极弱,且统计不显著,因此,在本文中并没有作专门论述,关于秦岭两栖、爬行动物 β 多样性海拔梯度格局形成的机制需要进一步的探讨。

3.2 物种种域海拔梯度格局及对Rapoport法则的验证

物种种域是宏生态学中的重要组成部分(Gaston, 2003)。两栖、爬行动物对环境因子(尤其是水分和温度)有极强的依赖性,因此成为验证Rapoport法则的理想对象(Whitton *et al.*, 2012)。Whitton等(2012)利用全球两栖动物物种分布图,采用中点法验证了全球两栖动物物种种域的分布并不支持Rapoport法则,Rapoport法则是区域现象并不是全球现象,仅局限于北半球,主要原因是北半球比南半球有明显的季节性气候。平均种域的算法在一定程度上调节了物种种域海拔梯度格局(沈泽昊和卢绮妍, 2009; 卢绮妍和沈泽昊, 2009; 张婉君等, 2010; 郑智等, 2014)。Blackburn和Gaston (2006)认为不同验证方法的使用有助于提高对Rapoport法则的认识,但Ruggiero和Werekraut (2007)并不支持此观点。目前所涉及的方法都在从不同角度构筑新的模拟模型以控制观测数据受到中域效应、取样效应等问题的影响,但在模拟模型的应用方面没有取得共识(Diniz-Filho & Tôrres, 2002; Beketov, 2009; 梁军和沈泽昊, 2010)。本研究采用Stevens法和逐种法验证秦岭两栖、爬行动物物种种域的海拔梯度格局,结果表明两栖动物很难判断是否支持Rapoport法则,而爬行动物趋向于支持Rapoport法则。

降雨量和年均温与两栖、爬行动物物种种域的线性回归模型表明,在海拔梯度上,两栖动物的种域大小与年降雨量的相关性较强,而爬行动物的种域与年均温相关性较强。这也反映这两类脊椎动物对水分和温度的不同生理需求,这种需求限制了它们在海拔梯度上的分布格局。

致谢: 北京大学的唐志尧和沈泽昊副教授、中国科学院成都生物研究所江建平研究员为本文的撰写提供了宝贵的建议,在此表示真诚的致谢!

参考文献

- Báldi A (2008) Habitat heterogeneity overrides the species–area relationship. *Journal of Biogeography*, **35**, 675–681.
- Barry RG (2008) *Mountain Weather and Climate*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Beketov MA (2009) The Rapoport effect is detected in a river system and is nested on nested organization. *Global Ecology and Biogeography*, **18**, 498–506.
- Blackburn TM, Gaston KJ (2006) There's more to macroecology than meets the eye. *Global Ecology and Biogeography*, **15**, 537–540.
- Chi XL (池秀莲), Tang ZY (唐志尧) (2011) Effects of area, temperature and geometric constraints on elevational patterns of species richness: a case study in the Mountain Taibai, Qinling Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), **35**, 362–370. (in Chinese with English abstract)
- Colwell RK (2008) RangeModel: tools for exploring and assessing geometric constraints on species richness (the mid-domain effect) along transects. *Ecography*, **31**, 4–7.
- Colwell RK, Rahbek C, Gotelli NJ (2004) The mid-domain effect and species richness patterns: what have we learned so far? *The American Naturalist*, **163**, E1–E23.
- Cooper N, Bielby J, Thomas GH, Purvis A (2008) Macroecology and extinction risk correlates of frogs. *Global Ecology and Biogeography*, **17**, 211–221.
- Currie DJ, Kerr JT (2008) Tests of the mid-domain hypothesis: a review of the evidence. *Ecological Monographs*, **78**, 3–18.
- Diniz-Filho JAF, Tôrres NM (2002) Rapoport effect in South American Carnivora (Mammalia): null models under geometric and phylogenetic constraints. *Brazilian Journal of Biology*, **62**, 437–444.
- Editorial Board for Mountains Climate Collected Works (山地气候文集编委会) (1984) *Mountain Climate Collected Works* (山地气候文集). Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)
- Editorial Board of Physical Geography of China, CAS (中国科学院中国自然地理编委会) (1980) *The Physical Geography of China, Volume of Physiognomy* (中国自然地理·地貌卷). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Fang JY (方精云), Shen ZH (沈泽昊), Tang ZY (唐志尧), Wang ZH (王志恒) (2004) The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 5–9. (in Chinese with English abstract)
- Fei L (费梁), Ye CY (叶昌媛), Jiang JP (江建平) (2012) *Colored Atlas of Chinese Amphibians and Their Distributions* (中国两栖动物及其分布彩色图鉴). Sichuan

- Publishing House of Science and Technology, Chengdu. (in Chinese)
- Fraser RH, Currie DJ (1996) The species richness–energy hypothesis in a system where historical factors are thought to prevail: coral reefs. *The American Naturalist*, **148**, 138–159.
- Fu CZ, Hua X, Li J, Chang Z, Pu ZC, Chen JK (2006) Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: geometric constraints, area and climate effects. *Ecography*, **29**, 919–927.
- Fu CZ, Wang JX, Pu ZC, Zhang SL, Chen HL, Zhao B, Chen JL, Wu JH (2007) Elevational gradients of diversity for lizards and snakes in the Hengduan Mountains, China. *Biodiversity and Conservation*, **16**, 707–726.
- Gaston KJ (2003) *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges*. Oxford University Press, New York.
- Gaston KJ (2000) Global patterns in biodiversity. *Nature*, **405**, 220–227.
- Gaston KJ, Chown SL, Evans KL (2008) Ecogeographical rules: elements of a synthesis. *Journal of Biogeography*, **35**, 483–500.
- Gouveia SF, Dobrovolski R, Lemes P, Cassemiro FAS, Diniz-Filho JAF (2013) Environmental steepness, tolerance gradient, and ecogeographical rules in glassfrogs (Anura: Centrolenidae). *Biological Journal of the Linnean Society*, **108**, 773–783.
- Grytnes JA, Beaman JH (2006) Elevational species richness patterns for vascular plants on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Biogeography*, **33**, 1838–1849.
- Hawkins BA, Diniz-Filho JAF, Weis AE (2005) The mid-domain effect and diversity gradients: is there anything to learn. *The American Naturalist*, **166**, E140–E143.
- Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Cornell HV, Currie DJ, Guégan JF, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003) Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology*, **84**, 3105–3117.
- Heikkinen KR, Luoto M, Kuussaari M, Pöyry J (2005) New insights into butterfly–environment relationships using partitioning methods. *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences*, **272**, 2203–2210.
- Hu JH, Xie F, Li C, Jiang JP (2011) Elevational patterns of species richness, range and body size for spiny frogs. *PLoS ONE*, **6**, e19817.
- Hunter ML, Yonzon P (1993) Altitudinal distributions of birds, mammals, people, forests, and parks in Nepal. *Conservation Biology*, **7**, 420–423.
- Letcher A, Harvey P (1994) Variation in geographical range size among mammals of the Palearctic. *The American Naturalist*, **144**, 30–42.
- Li C (李成), Li SQ (李胜全), Wang YZ (王跃招), Zhang T (张涛) (2000) Herpetological survey of southern Gansu Province, China. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **19** (2), 74–76. (in Chinese with English abstract)
- Li QY (李巧燕), Wang XP (王襄平) (2013) Elevational pattern of species richness in the Three Gorges Region of the Yangtze River: effect of climate, geometric constraints, area and topographical heterogeneity. *Biodiversity Science* (生物多样性), **21**, 141–152. (in Chinese with English abstract)
- Liang J (梁军), Shen ZH (沈泽昊) (2010) On the test of the Rapoport's rule, algorithm comparison, and weakening of mid-domain effect: with a case study on the seed plants in Mt. Wuliang, Yunnan Province. *Journal of Mountain Science* (山地学报), **28**, 526–533. (in Chinese with English abstract)
- Lu QY (卢绮妍), Shen ZH (沈泽昊) (2009) Altitudinal pattern of species range size of vascular plants in Mt. Shennongjia: a test of Rapoport's Rule. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 644–651. (in Chinese with English abstract)
- Kreft H, Jetz W (2007) Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **104**, 5925–5930.
- McCain CM (2010) Global analysis of reptile elevational diversity. *Global Ecology and Biogeography*, **19**, 541–553.
- McCain CM, Grytnes JA (2010) Elevational gradients in species richness. In: *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*, pp. 1–10. John Wiley & Sons, New York.
- O'Brien EM (1993) Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora. *Journal of Biogeography*, **20**, 181–198.
- O'Brien EM (1998) Water-energy dynamics, climate, and prediction of woody plant species richness: an interim general model. *Journal of Biogeography*, **25**, 379–398.
- de Oliveira G, Diniz-Filho JAF (2010) Spatial patterns of terrestrial vertebrate richness in Brazilian semiarid, northeastern Brazil: selecting hypotheses and revealing constraints. *Journal of Arid Environments*, **74**, 1418–1426.
- Orme CDL, Davies RG, Burgess M, Eigenbrod F, Pickup N, Olson VA, Webster AJ, Ding TS, Rasmussen PC, Ridgely RS, Stattersfield AJ, Bennett PM, Blackburn TM, Gaston KJ, Owens LPF (2005) Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat. *Nature*, **436**, 1016–1019.
- Parmesan C (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climates change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **37**, 637–669.
- Qiao XJ, Tang ZY, Shen ZH, Fang JY (2012) What causes geographical variation in the species–area relationship? A test from forests in China. *Ecography*, **35**, 1110–1116.
- Rahbek C (1995) The elevational gradient of species richness: a uniform pattern? *Ecography*, **18**, 200–205.
- R Development Core Team (2013) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org>.
- Ruggiero A, Werekraut V (2007) One-dimensional analyses of Rapoport's rule reviewed through meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, **16**, 401–414.

- Shaanxi Institute of Zoology (陕西省动物研究所), Institute of Hydrobiology of Chinese Academy of Sciences (中国科学院水生生物研究所), Biological Department of Lanzhou University (兰州大学生物系) (1987) *The Fishes of Qinling Range* (秦岭鱼类志). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Shen ZH (沈泽昊), Lu QY (卢绮妍) (2009) The Rapoport's rule for the geographic patterns of species range size. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 560–567. (in Chinese with English abstract)
- Stevens GC (1989) The latitudinal gradient in geographical range: How so many species coexist in the tropics? *The American Naturalist*, **133**, 240–256.
- Stevens GC (1992) The elevational gradient in altitudinal range, an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *The American Naturalist*, **140**, 893–911.
- Stuart SN, Chanson JS, Cox NA, Young BE, Rodrigues ASL, Fishchman DL, Waller RW (2004) Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, **306**, 1783–1786.
- Tang ZY (唐志尧), Fang JY (方精云) (2004) A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 20–28. (in Chinese with English abstract)
- Tang ZY (唐志尧), Ke JH (柯金虎) (2004) Altitudinal patterns of plant species diversity in Mt. Niubeiliang, Qinling Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **12**, 108–114. (in Chinese with English abstract)
- Triantis KA, Mylonas M, Lika K, Vardinoyannis K (2003) A model for the species–area–habitat relationship. *Journal of Biogeography*, **30**, 19–27.
- Vetaas OR, Grytnes JA (2002) Distribution of vascular plant species richness and endemic richness along the Himalayan elevation gradient in Nepal. *Global Ecology and Biogeography*, **11**, 291–301.
- Vitt LJ, Caldwell JP (2009) *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles*. Science Press, New York.
- Wang XP, Fang JY (2012) Constraining null models with environmental gradients: a new method for evaluating the effects of environmental factors and geometric constraints on geographic diversity patterns. *Ecography*, **35**, 1147–1159.
- Wang XP (王襄平), Fang JY (方精云), Tang ZY (唐志尧) (2009) The mid-domain effect hypothesis: models, evidence and limitations. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 568–578. (in Chinese with English abstract)
- Wang ZH, Tang ZY, Fang JY (2007) Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, in China's mountains. *Diversity and Distributions*, **13**, 845–854.
- Whitton FJS, Purvis A, Orme CDL, Olalla-Tárraga MA (2012) Understanding global patterns in amphibian geographic range size: does Rapoport rule? *Global Ecology and Biogeography*, **21**, 179–190.
- Xie F (谢锋), Liu HN (刘惠宁), Stuart SN, Chanson JS, Cox NA, Fischman DL (2006) Review on protective demands of Chinese amphibians. *Science in China Series C: Life Sciences* (中国科学C辑), **36**, 570–581. (in Chinese)
- Zhang MW (张孟闻), Zong Y (宗愉), Ma JF (马积藩) (1998) *Fauna Sinica, Reptile, Vol. 1* (中国动物志·爬行纲·第一卷). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zhang RZ (张荣祖) (2011) *Zoogeography of China* (中国动物地理). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zhang WJ (张婉君), Lu QY (卢绮妍), Liang J (梁军), Shen ZH (沈泽昊) (2010) Altitudinal gradients of species richness and range size of vascular plants in Taiwan: a test of Rapoport's rule. *Biodiversity Science* (生物多样性), **18**, 312–322. (in Chinese with English abstract)
- Zhao EM (赵尔宓) (2006) *Snakes of China* (中国蛇类). Anhui Science and Technology Publishing House, Hefei. (in Chinese)
- Zhao EM (赵尔宓), Jiang YM (江耀明), Huang QY (黄庆云), Zhao H (赵惠), Zhao KT (赵肯堂), Zhou KY (周开亚), Liu YZ (刘月珍), Liu MY (刘明玉), Li DJ (李德俊), Zhang YX (张玉霞) (1999) *Fauna Sinica Reptile Vol. 2* (中国动物志·爬行纲·第二卷). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zheng Z (郑智), Gong DJ (龚大洁), Sun CX (孙呈祥) (2014) Elevational pattern of species richness and species range size of herpetofauna in Baishuijiang Nature Reserve: a test of Rapoport's rule. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **33**, 537–546. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZC (朱志诚) (1991) Features of vegetation zones on the Qinling Mountain and its loess plateau. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), **11**, 157–164. (in Chinese)

(责任编辑: 沈泽昊 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 秦岭两栖爬行动物物种数据参考文献

Appendix 1 Literature sources for secondary data on amphibian and reptile distributions in the Qinling Range
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-005-1.pdf>

附表1 秦岭两栖、爬行动物物种名录及其海拔分布

Table S1 List of amphibian and reptile species and their elevational range in the Qinling Mountain Ranges
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2014-005-2.pdf>

附录1 秦岭两栖爬行动物物种数据参考文献

Appendix 1 Literature sources for secondary data on amphibian and reptile distributions in the Qinling Range

- Chen XH (陈晓虹), Jiang JP (江建平) (2004) Supplementary description of *Paa (Fei Rana) Taihangnicus* (Anura, Ranidae) from Taihong Mountain, Henan of China. *Acta Zootaxonomica Sinica* (动物分类学报), **29**, 595–599. (in Chinese with English abstract)
- Chen XH (陈晓虹), Li L (李磊), Jiang JP (江建平), Qiao L (乔梁), Yang J (杨杰) (2009) Supplementary description geographic distribution of *Scutiger ningshanensis*, from Funiu Mountain, Henan, China. *Acta Zootaxonomica Sinica* (动物分类学报), **34**, 647–653. (in Chinese with English abstract)
- Chen XH (陈晓虹), Yang J (杨杰), Qu WY (瞿文元) (2007) The geographical distribution of *Pseudohynobius tsinpendensis* newly discovered in Henan Province. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **42**, 148–150. (in Chinese with English abstract)
- Fang RS (方荣盛) (1985) A new species of *Scutiger* from Shaanxi, China. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **4**, 305–307. (in Chinese)
- Fang RS (方荣盛), Song MT (宋鸣涛) (1981) Original survey of snakes in the southern slope in Qinling eastern domain. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)* (陕西师范大学学报(自然科学版)), **1981**, 263–272. (in Chinese with English abstract)
- Fang RS (方荣盛), Wang TZ (王廷正) (1983) Three snake records in Shaanxi Province. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **2**, 75–76. (in Chinese with English abstract)
- Gong HS (巩会生), Zeng ZG (曾治高), Song TP (宋团谱), Zheng XY (郑晓燕), Cai XL (蔡晓丽), Fu P (付沛) (2012) Compositions and distributions of amphibians and reptiles in Foping Natural Reserve. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), **27**, 122–126. (in Chinese with English abstract)
- Gong DJ (龚大洁), Mou M (牟迈), Li XP (李晓鹏), Teng JR (滕继荣), Zhang KR (张可荣) (2008) Reproductive behavior of *Tylototriton wenxianensis*. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **43**(4), 48–55. (in Chinese with English abstract)
- Hu SQ (胡淑琴), Zhao EM (赵尔宓), Liu CZ (刘承钊) (1996) A herpetological survey of the Tsining and Taipaishan region. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **18**, 57–89. (in Chinese with English abstract)
- Jiang JP (江建平), Wang B (王斌), Liu TY (刘炯宇), Xie F (谢锋) (2006) Amphibians in Laoxiancheng Nature Reserve. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **25**, 281–284. (in Chinese with English abstract)
- Li C (李成), Li SQ (李胜全), Wang YZ (王跃招), Zhang T (张涛) (2000) Herpetological survey of southern Gansu Province, China. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **19**, 74–76. (in Chinese with English abstract)
- Ma Y (马勇), Ma YS (马亦生), Gong HS (巩会生), Song MT (宋鸣涛), Xiao H (肖红), Yang JT (杨俊涛) (2006) Preliminary investigation on amphibian and reptilian in Taibaishan National Nature Reserve, Shaanxi. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **25**, 277–286. (in Chinese with English abstract)
- Pope CH (1935) *The Reptiles of China: Turtles, Crocodilians, Snakes, Lizards*. American Museum of Natural History, New York.
- Song MT (宋鸣涛) (1985) A new species of *Gekko* from Shaanxi Province. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **4**, 329–330. (in Chinese with English abstract)
- Song MT (宋鸣涛) (1987a) The Herpetofauna of Shaanxi Province. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **6**, 63–73. (in Chinese with English abstract)
- Song MT (宋鸣涛) (1987b) Survey of the reptiles of southern Shaanxi Province. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **6**, 59–64. (in Chinese)
- Song MT (宋鸣涛) (1986) The Herpetofauna in Taibaishan Northern slope of Qinling Mountain. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **5**, 9–11. (in Chinese with English abstract)
- Song MT (宋鸣涛), Fang RS (方荣盛) (1982) The utilization of amphibian and reptilian and the analysis of food of snakes in the south flank of Qinling range. *Zoological Research* (动物学研究), **3**, 243–250. (in Chinese with English abstract)
- Stejneger L (1925) Chinese amphibians and reptiles in the United States National Museum. *Proceedings of the United States National Museum*, **66**, 1–115.
- Xia ZR (夏中荣), Chen XH (陈晓虹), Liang JB (梁俊波) (2006) A survey on diversity of amphibians in Funiu Mountain, Henan. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **25**, 307–311. (in Chinese with English abstract)
- Yang X, Wang B, Hu JH, Jiang JP (2011) A new species of the genus *Feirana* (Amphibia: Anura: Dicroglossidae) from the western Qinling Mountains of China. *Asian Herpetological Research*, **2**, 72–86.
- Yao CY (姚崇勇), Zhang SZ (张绳祖) (1989) Herpetology from the forest regions of the Xiaolong Mountain in Gansu. *Journal of*

Northwestern Normal University (Natural Science Edition) (西北师范大学学报(自然科学版)), **1**, 55–68. (in Chinese with English abstract)

Yuan H (原洪) (1983) A herpetological survey in Huoditang forest of the Qinling Mountain. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **2**, 59–64. (in Chinese with English abstract)

Yuan H (原洪) (1985) Reptile fauna of Shaanxi Province. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **4**, 133–139. (in Chinese with English abstract)

Yuan H (原洪), Huang ZF (黄正发) (1985) A herpetological survey in Foping natural Reserve. *Acta Herpetologica Sinica* (两栖爬行动物学报), **4**, 50–51. (in Chinese with English abstract)

Zhang Q (张琼), Gong DJ (龚大洁), Zhang KR (张可荣), Xu Y (许颖) (2007) Investigation and conservation measures on amphibians and reptiles in Gansu Baishuijiang Nature Reserve. *Sichuan Journal of Zoology* (四川动物), **26**, 329–332. (in Chinese with English abstract)

附表1 秦岭两栖、爬行动物物种名录及其海拔分布
Table S1 List of amphibian and reptile species and their elevational range in the Qinling Mountain Ranges

物种 Species	区系成分 Faunal components	海拔分布 Elevational range (m)
两栖动物	Amphibain	
隐鳃鲵科	Cryptobranchidae	
大鲵*	<i>Andrias davidianus</i>	广布种 700–1,900
小鲵科	Hynobiidae	
秦巴拟小鲵*	<i>Pseudohynobius tsinpaensis</i>	东洋界 1,700–2,700
黄斑拟小鲵**	<i>P. flavomaculatus</i>	东洋界 1,850–2,300
西藏山溪鲵*	<i>Batrachuperus tibetanus</i>	广布种 1,260–2,700
蝾螈科	Salamandridae	
文县瑶螈*	<i>Yaotriton wenzianensis</i>	东洋界 1,100–1,300
角蟾科	Megophryidae	
峨山掌突蟾**	<i>Paramegophrys oshanensis</i>	东洋界 950–1,700
小角蟾**	<i>Megophrys minor</i>	东洋界 1,400–2,100
南江角蟾**	<i>M. nankiangensis</i>	东洋界 1,600–1,850
巫山角蟾*	<i>M. wushanensis</i>	东洋界 950–1,450
川北齿蟾**	<i>Oreolalax chuanbeiensis</i>	广布种 960–1,450
宁陕齿突蟾**	<i>Scutiger (Scutiger) ningshanensis</i>	东洋界 1,250–2,550
平武齿突蟾**	<i>S. (Scutiger) pingwuensis</i>	东洋界 2,050–2,500
胸腺猫眼蟾**	<i>S. (Aelurophryne) glandulatus</i>	东洋界 1,600–1,800
蟾蜍科	Bufonidae	
华西大蟾蜍*	<i>Bufo gargarizans</i>	东洋界 300–1,700
中华大蟾蜍*	<i>B. gargarizans</i>	广布种 140–2,400
花背蟾蜍*	<i>Strauchbufo raddei</i>	古北界 350–2,000
雨蛙科	Hylidae	
秦岭雨蛙*	<i>Hyla tsinlingensis</i>	东洋界 890–2,300
蛙科	Ranidae	
黑斑侧褶蛙*	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	广布种 140–2,800
叉舌蛙科	Dicroglossidae	
泽陆蛙*	<i>Fejervarya multistriata</i>	东洋界 140–1,200
绿臭蛙*	<i>Odorrana margaretae</i>	东洋界 1,000–1,300
大绿臭蛙*	<i>O. graminea</i>	东洋界 1,200–1,400
棘腹蛙*	<i>Quasipaa boulengeri</i>	广布种 610–1,900
太行隆肛蛙*	<i>Feirana taihangnica</i>	东洋界 500–1,700
康县隆肛蛙*	<i>F. kangxianensis</i>	东洋界 780–1,962

物种 Species		区系成分 Faunal components	海拔分布 Elevational range (m)
隆肛蛙*	<i>F. quadranus</i>	广布种	500–2,200
中国林蛙*	<i>Rana chensinensis</i>	广布种	450–2,500
崇安湍蛙*	<i>Amolops chunganensis</i>	东洋界	670–1,200
四川湍蛙*	<i>A. mantzorum</i>	东洋界	1,100–2,250
树蛙科	Rhacophoridae		
斑腿泛树蛙*	<i>Polypedates megacephalus</i>	东洋界	600–1,200
姬蛙科	Microhylidae		
合征姬蛙*	<i>Microhyla mixtata</i>	广布种	610–1,700
饰纹姬蛙*	<i>M. fissipes</i>	东洋界	140–1,650
花姬蛙**	<i>M. pulchra</i>	东洋界	550–750
北方狭口蛙*	<i>Kaloula borealis</i>	广布种	450–860
四川狭口蛙**	<i>K. rugifera</i>	东洋界	950–1,600
爬行动物	Reptile		
龟科	Testudinidae		
乌龟*	<i>Chinemys reevesii</i>	广布种	450–1,550
鳖科	Trionychidae		
鳖*	<i>Trionyx sinensis</i>	广布种	450–1,500
山瑞鳖**	<i>T. steindachneri</i>	广布种	500–600
石龙子科	Scincidae		
蓝尾石龙子*	<i>Eumeces elegans</i>	广布种	700–900
中国石龙子**	<i>E. chinensis</i>	东洋界	2,110–2,310
黄纹石龙子*	<i>E. xanthi</i>	广布种	640–1,900
秦岭滑蜥*	<i>Leiopisma tsinlingensis</i>	广布种	890–2,100
铜蜓蜥*	<i>Sphenomorphus indicus</i>	东洋界	450–1,900
丽斑麻蜥*	<i>Eremias argus</i>		300–1,100
北草蜥*	<i>Takydromus septentrionalis</i>		450–2,100
鬣蜥科	Agamidae		
丽纹龙蜥**	<i>Japalura splendida</i>	东洋界	450–900
草绿龙蜥**	<i>J. flaviceps</i>	东洋界	450–900
米仓龙蜥*	<i>Japalura micangshanensis</i>	东洋界	760–1,300
壁虎科	Gekkonidae		
多疣壁虎*	<i>Gekko japonicus</i>	东洋界	400–1,400
无蹼壁虎*	<i>G. swinhonis</i>	广布种	300–1,400
太白壁虎*	<i>G. taibaiensis</i>	东洋界	900–1,600
蝮科	Viperidae		
白头蝮**	<i>Azemiop feae</i>	东洋界	980–1,700
短尾蝮*	<i>Gloydius brevicaudus</i>	广布种	850–2,590
中介蝮*	<i>G. intermedius</i>	古北界	500–1,894
高原蝮*	<i>G. strauchi</i>	广布种	890–2,800
山烙铁头*	<i>Ovophis monticola</i>	东洋界	1,150–2,000
菜花原矛头蝮*	<i>Protobothrops jerdonii</i>	广布种	800–2,500
竹叶青*	<i>Trimeresurus stejnegeri</i>	广布种	600–2,300
游蛇科	Colubridae		
黑脊蛇*	<i>Achalinus spinalis</i>	东洋界	450–1,900
绣链腹链蛇**	<i>Amphiesma craspedogaster</i>	东洋界	650–1,700
棕黑腹链蛇**	<i>A. sauteri</i>	东洋界	650–1,100
绞花林蛇*	<i>Boiga kraepelini</i>	东洋界	700–900
黄脊游蛇**	<i>Coluber spinalis</i>	古北界	430–1,300
翠青蛇*	<i>Cyclophiops major</i>	广布种	450–1,700

物种 Species		区系成分 Faunal components	海拔分布 Elevational range (m)
赤链蛇*	<i>Dinodon rufozonatum</i>	广布种	300–1,700
王锦蛇*	<i>Elaphe carinata</i>	广布种	450–1,800
白条锦蛇*	<i>E. dione</i>	古北界	300–1,500
玉斑锦蛇**	<i>E. mandarian</i>	广布种	300–1,550
紫灰锦蛇**	<i>E. porphyracea</i>	东洋界	600–1,700
黑眉锦蛇*	<i>E. taeniura</i>	广布种	450–1,700
棕黑锦蛇**	<i>E. schrenckii</i>	东洋界	300–900
团花锦蛇**	<i>E. davidi</i>	古北界	850–900
双斑锦蛇*	<i>E. bimaculate</i>	广布种	500–1,200
黑背白环蛇**	<i>Lycodon ruhsrlratilyoo</i>	东洋界	1,100–1,450
双全白环蛇**	<i>L. fasciatus</i>	广布种	650–1,700
宁陕小头蛇**	<i>Oligodon ningshanensis</i>	东洋界	1,400–1,650
横纹小头蛇**	<i>O. multizonatum</i>	东洋界	790–1,350
福建颈斑蛇**	<i>Plagiopholis styani</i>	东洋界	500–700
大眼斜鳞蛇*	<i>Pseudoxenodon macrops</i>	广布种	600–2,000
颈槽蛇*	<i>Rhabdophis nuchalis</i>	广布种	600–2,000
虎斑颈槽蛇*	<i>R. tigrina</i>	东洋界	300–1,900
黑头剑蛇**	<i>Sibynophis chinensis</i>	广布种	610–1,400
乌华游蛇*	<i>Sinonnatrix percarinate</i>	东洋界	450–1,700
小头坭蛇**	<i>Trachischium tenuiceps</i>	东洋界	600–800
乌梢蛇*	<i>Zaocys dhumnades</i>	广布种	450–1,800

**¹来源于文献, *来自作者 ** from literature, * from author .