

甘肃麝鼠和高原麝鼠小肠组织学结构的比较

杨传华^{1,3} 都玉蓉² 林恭华¹ 苏建平¹ 张同作^{1*}

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001) (2 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810008)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 甘肃麝鼠小肠仅为相同体重高原麝鼠小肠长度的 70%, 为满足相同的能量需求, 甘肃麝鼠消化系统中某些部位必然会发生相应调整, 以代偿其较短的小肠在能量消化吸收方面的不足。本研究应用苏木精-伊红染色技术, 对成年甘肃麝鼠和高原麝鼠的小肠组织学结构进行了对比研究。结果显示, 甘肃麝鼠十二指肠、空肠和回肠绒毛间距均显著小于高原麝鼠, 而其空肠管径显著大于高原麝鼠, 两种麝鼠小肠总绒毛面积无明显差异。研究表明, 甘肃麝鼠通过缩小小肠绒毛间距并增大空肠管径来增加小肠吸收表面积, 减缓食物通过速率, 提高小肠对食物的营养吸收和消化功能, 进而代偿其较短的小肠在能量消化和吸收方面的不足。

关键词: 甘肃麝鼠; 高原麝鼠; 小肠; 组织学结构; 适应

中图分类号: Q954

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2013) 02-0172-06

Histological structure comparison of the small intestine between Gansu zokor (*Myospalax cansus*) and plateau zokor (*Myospalax baileyi*)

YANG Chuanhua^{1,3}, DU Yurong², LIN Gonghua¹, SU Jianping¹, ZHANG Tongzuo^{1*}

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

(2 The School of Life and Geography Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The small intestine length of Gansu zokor (*Myospalax cansus*) about 70 percent that of the plateau zokor (*M. baileyi*). To meet the same energy requirements, some parts of the digestive system in Gansu zokor must be adjusted to compensate for deficiencies of digestive and absorptive abilities. The histological structure of the small intestine of the two zokor species was compared using the hematoxylin-eosin (HE) staining technique. It was revealed that the villus gaps in the duodenum, jejunum and ileum of Gansu zokors were obviously smaller than those of the plateau zokor, but the inside diameter of its jejunum was significantly bigger than that of the plateau zokor. However, there were no significant difference in the total areas of villus between two species. Our study suggests that the reduced villus gaps of small intestine and the enlarged inside diameter of jejunum serve to increase the absorptive areas of small intestine, slow down the rate of food passing and improve nutritional absorption and digestion. As a result, the deficiencies of digestive and absorptive abilities are offset to some extent.

Key words: Adaptation; Histological structure; *Myospalax baileyi*; *Myospalax cansus*; Small intestine

消化道是消化系统的主要组成部分, 其形态结构与环境温度、食物质量等密切相关 (鲍新毅等, 2001; Munn *et al.*, 2006)。温度和食物质量等明显影响动物的消化道形态, 如消化道大小 (Gross *et al.*, 1985; Green and Millar, 1987; Wunder, 1992; 王德华等, 1995) 和肠道绒毛形态 (Barry, 1976; Gross *et al.*, 1985; Woodall, 1987)。消化道

形态结构变化主要表现在两个方面: 一是消化道容积变化, 以消化道长度变化为主要测量指标; 二是消化道壁组织结构的变化, 如微绒毛增加, 粘膜厚度增加等 (杜卫国等, 2001)。小肠是动物进行食物消化和营养吸收的主要场所, 呈管状, 分为十二指肠、空肠、回肠三部分, 小肠的中前部是营养物质的主要消化吸收部位, 尤其空肠是营养物质消化

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30970366); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (0954021211)

作者简介: 杨传华 (1983 -), 女, 硕士研究生, 主要从事动物生态学研究。

收稿日期: 2012-08-01; 修回日期: 2013-01-29

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: zhangtz@nwipb.cas.cn

的主要场所 (Booth, 1968; Gross *et al.*, 1985; Hammond and Wunder, 1991; 张铁涛等, 2012)。小肠粘膜上有皱襞、小肠绒毛及微绒毛的特殊结构, 进一步扩大了小肠吸收营养物质的表面积 (Caspary, 1992)。小肠绒毛形态 (长度、宽度和间距) 和绒毛表面积是反映肠道营养吸收能力的重要指标。绒毛长度反映了肠道的功能状况, 与营养吸收正相关 (Caspary, 1992; Tarachai and Yamachi, 2000; Baurhoo *et al.*, 2011)。绒毛表面积大小在一定程度上反映小肠消化吸收能力的强弱 (Uni *et al.*, 1995; Kisielinski *et al.*, 2002)。

甘肃鼯鼠 (*Myospalax cansus*) 和高原鼯鼠 (*Myospalax baileyi*) 是两个近缘物种 (Norris *et al.*, 2004; Zhou and Zhou, 2008), 前者广布于陕西、甘肃、宁夏和青海东部的荒山、荒坡、林地、灌木林地、农耕地, 而后者主要分布于青海、甘肃南部及四川西部的高山草甸、高寒草甸、高山灌丛、农田、浅滩及荒地区域 (李瑛, 1997; Zhang *et al.*, 2003)。两种鼯鼠生活方式和取食习性极为相似, 为典型地下鼠, 依靠地下挖掘获取食物, 以根、茎为主要食物来源 (樊乃昌和施银柱, 1982)。哺乳动物能量需求包括基础代谢、食物代谢、体力活动、生长发育、怀孕、哺乳所消耗的能量 (Kirkwood, 1991)。由经典异速生长规律 $MR = aM^b$ 可知代谢率主要受动物体重影响 (Kleiber, 1932; West *et al.*, 1997, 1999; Savage *et al.*, 2004; Luo and Wang, 2012), 则体重相同的甘肃鼯鼠和高原鼯鼠代谢率应该非常相近。据此我们推知: 相同季节、相同体重的成年鼯鼠近缘种, 在无怀孕和哺乳的状态下, 其能量需求应该相近。但研究发现, 食物消化和营养吸收的主要部位——小肠在两种鼯鼠体内却发生了明显的分化, 甘肃鼯鼠小肠仅为相同体重高原鼯鼠小肠长度的 70% (杨传华等, 2012)。那么, 甘肃鼯鼠为满足自身的能量需求, 其消化系统中某些部位必然会发生相应调整, 以代偿其较短的小肠在能量消化吸收方面的不足, 从而满足其能量需求。本研究通过比较两种鼯鼠小肠组织学结构的差异, 特别是小肠管径、绒毛形态和绒毛表面积差异来验证上述预测, 同时可以更好地理解两种鼯鼠为适应各自生境而进化出的不同的消化策略。

1 研究方法

1.1 器官解剖和实验材料固定

2011 年 4 月在青海省互助县东和乡 (海拔:

3 128 m, 地理位置: 北纬 36°55', 东经 102°06', 年均气温: 1.2℃), 采集成年高原鼯鼠 6 只 (3 雄 3 雌), 体重为 287.22 ± 56.37 g (Mean \pm SD), 在青海省平安县三合镇 (海拔: 2 751 m, 地理位置: 北纬 36°23', 东经 101°58', 年均气温: 2.3℃), 采集成年甘肃鼯鼠 5 只 (3 雄 2 雌), 体重为 184.95 ± 62.23 g (Mean \pm SD), 所有个体均未参与繁殖。捕获后用乙醚麻醉, 称量体重, 记录性别, 解剖。仔细分离出小肠, 并小心剔除肠系膜及其他组织, 分别截取十二指肠 (距幽门处 2 cm)、空肠 (距小肠前端三分之一处)、回肠 (距盲肠处 4 cm) 2 cm 左右的样品, 用温热生理盐水充分冲洗肠腔内容物, 放入 4% 的多聚甲醛固定液中固定 24 h 后, 转入 70% 的酒精中 4℃ 保存。

1.2 切片制作

将固定好的小肠各部位材料, 用自来水冲洗干净, 梯度酒精脱水、二甲苯透明、浸蜡、包埋等处理后, 在室温下制作连续横端面切片, 切片厚 8 μ m。在连续切片中每隔 5 张取出一张, 经二甲苯脱蜡、梯度酒精脱水、苏木精染色、盐酸分化, 再用伊红复染, 最后经梯度酒精脱水, 二甲苯透明, 中性加拿大树胶封片, 镜检, 用 NIKON (DMBA-400-B) 显微镜摄影。

1.3 观察

取小肠绒毛走向平直、结构完整的切片进行观察, 并在 400 倍视野下拍照 (目镜 $\times 4$, 物镜 $\times 100$), 每张切片观察 3 个视野。

1.4 数据测量与计算

小肠绒毛形态结构见图 1 (转引自 Kisielinski *et al.*, 2002)。通常, 小肠绒毛被模拟为顶部是半球的圆柱体, 模拟计算图形见图 2 (自制)。显微镜下测量小肠绒毛长度、宽度、间距。绒毛长度 ($h+r$, 单位: mm): 从绒毛基部 (肠腺与绒毛连接处) 到绒毛顶端的距离; 绒毛宽度 ($2r$, 单位: mm): 以绒毛中部为准; 绒毛间距 (g , 单位: mm): 绒毛基部 (肠腺与绒毛连接处) 之间的距离 (Nabuurs, 1993; 王亚鸣, 1994; 伍烽等, 1998; Ganessunker *et al.*, 1999; Duh *et al.*, 2000)。每只鼯鼠每一部位统计两张切片, 每个视野选取 10 根绒毛测定长度、宽度和间距, 每一指标测定 3 次。绒毛表面积 (mm^2): $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot r^2$ (Kisielinski *et al.*, 2002)。小肠管径 (mm) 测量: 将小肠纵向剪开后展平, 用游标卡尺测量管径的周长, 根据圆周公式计算小肠管径。

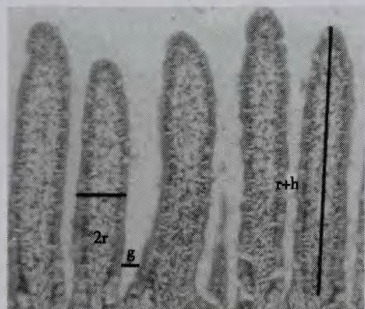


图1 小肠绒毛显微结构 (引自 Kisielinski *et al.*, 2002)

Fig.1 Small intestine villus microstructure (Kisielinski *et al.*, 2002)

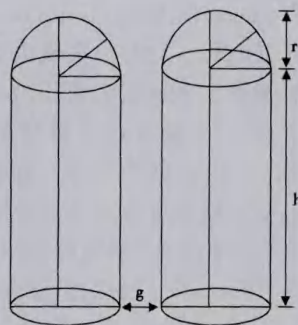


图2 小肠绒毛模拟图

Fig.2 Small intestine villus simulation

1.5 统计分析

以每张照片中所测数据指标和计算数据的平均值为基本统计数据。数据经 Shapiro-Wilk 和 Levene 检验符合正态分布和方差齐性, 用 One-Way ANOVA 分别检验两种鼢鼠不同性别间小肠各组织学变量差异。结果表明两种鼢鼠雌雄两性小肠各组织学变量大小均没有显著差异, 故小肠各组织学变量种间比较时不分性别。为消除体重对小肠各组织学变

量的影响, 以体重为协变量, 用协方差分析两种鼢鼠小肠各组织学变量大小差异。统计分析在 SPSS 16.0 中完成, 对统计结果的描述均采用平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。

2 结果

两种鼢鼠小肠组织学显微结构、测量计算的数据及统计分析结果分别见图 3 和表 1。

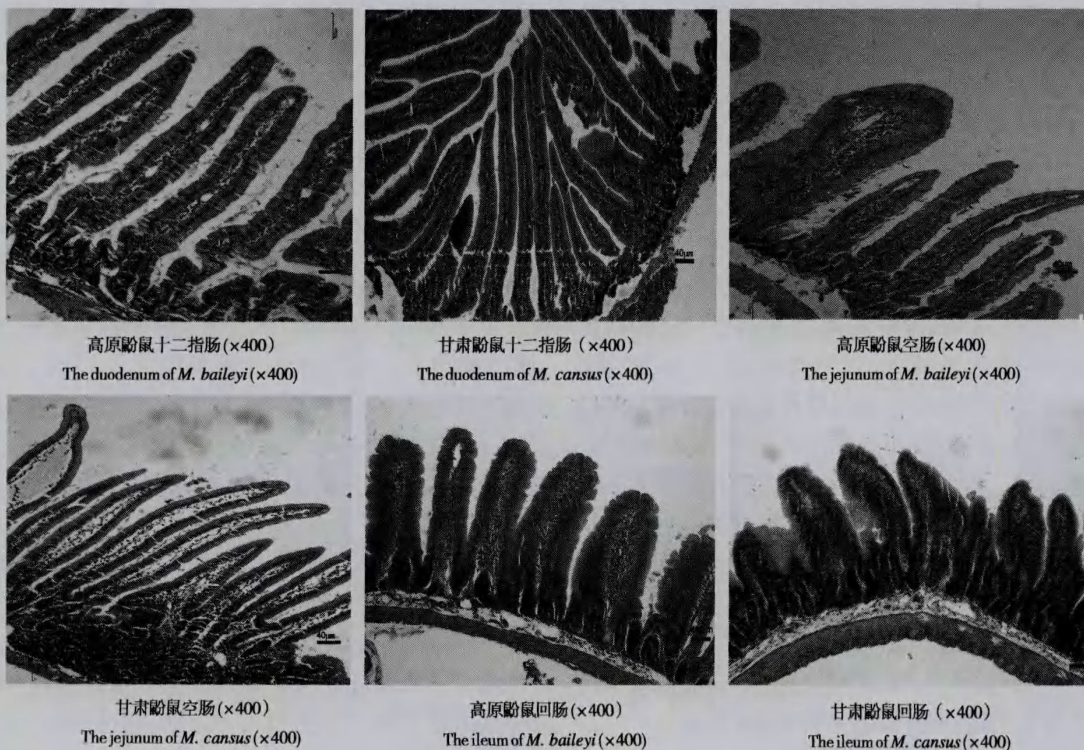


图3 甘肃鼢鼠和高原鼢鼠小肠组织显微结构图

Fig.3 Small intestinal microstructure of *M. cansus* and *M. baileyi*

统计分析结果表明, 在种内水平, 仅高原鼯鼠雌性十二指肠管径大于雄性 ($F_{1,4} = 16.07, P < 0.05$), 两种鼯鼠雌雄间其他组织学指标都无显著性差异 ($P > 0.05$)。故小肠各组织学变量种间比较时不分性别。在种间水平, 甘肃鼯鼠十二指肠、空肠和回肠绒毛间距均显著小于高原鼯鼠 ($F_{1,9} = 15.39, P < 0.05; F_{1,9} = 6.09, P < 0.05; F_{1,9} =$

$7.90, P < 0.05$), 而其空肠管径显著大于高原鼯鼠 ($F_{1,9} = 8.38, P < 0.05$)。两种鼯鼠小肠总绒毛面积和十二指肠、回肠管径大小均无显著差异 ($P > 0.05$)。由图 3 和表 1 实测数据可知, 甘肃鼯鼠十二指肠和空肠绒毛形态较高原鼯鼠细长, 但统计学上未反映出明显的显著差异 ($P > 0.05$)。

表 1 两种鼯鼠小肠组织学指标大小及统计分析结果

Table 1 Microstructural measures and statistic results of small intestines in two zokor species

高原鼯鼠 <i>Myospalax baileyi</i>						
测定项目 Items measured	部位 Section	雌性 Female	雄性 Male	两性 Both sexes	<i>F</i>	<i>P</i>
管径 Inside diameter	D	4.35 ± 0.03	4.25 ± 0.03	4.30 ± 0.06	16.071	s
	J	3.42 ± 0.04	3.30 ± 0.07	3.36 ± 0.08	6.353	ns
	I	2.95 ± 0.17	2.88 ± 0.07	2.91 ± 0.12	0.391	ns
绒毛长度 Villus length	D	0.79 ± 0.07	0.78 ± 0.07	0.79 ± 0.06	0.046	ns
	J	0.61 ± 0.01	0.57 ± 0.03	0.59 ± 0.03	4.068	ns
	I	0.32 ± 0.03	0.38 ± 0.08	0.35 ± 0.06	1.102	ns
绒毛宽度 Villus width	D	0.17 ± 0.04	0.19 ± 0.19	0.18 ± 0.03	0.457	ns
	J	0.12 ± 0.04	0.17 ± 0.08	0.15 ± 0.06	1.053	ns
	I	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.04	0.14 ± 0.03	0.017	ns
绒毛间距 Villus gap	D	0.03 ± 0.002	0.04 ± 0.004	0.04 ± 0.003	0.014	ns
	J	0.04 ± 0.004	0.04 ± 0.003	0.04 ± 0.003	0.062	ns
	I	0.04 ± 0.001	0.04 ± 0.003	0.04 ± 0.002	2.239	ns
绒毛表面积 Villus surface area	D	21 513.59 ± 5 006.78	18 605.84 ± 1 066.27	20 059.71 ± 3 608.10	0.968	ns
	J	58 856.05 ± 16 921.00	49 435.55 ± 17 298.86	54 145.80 ± 16 150.91	0.455	ns
	I	35 876.05 ± 10 260.00	45 965.54 ± 5 671.26	40 920.80 ± 9 247.23	2.222	ns
总绒毛表面积 Total villus surface area		116 245.69 ± 31 782.21	114 006.93 ± 20 710.61	115 126.31 ± 24 023.30	0.010	ns
甘肃鼯鼠 <i>Myospalax cansus</i>						
测定项目 Items measured	部位 Section	雌性 Female	雄性 Male	两性 Both sexes	<i>F</i>	<i>P</i>
管径 Inside diameter	D	4.32 ± 0.06	4.39 ± 0.06	4.36 ± 0.06	1.622	ns
	J	3.44 ± 0.03	3.39 ± 0.02	3.41 ± 0.03	4.200	ns
	I	2.99 ± 0.18	2.99 ± 0.13	2.99 ± 0.13	0.001	ns
绒毛长度 Villus length	D	0.79 ± 0.03	0.88 ± 0.09	0.84 ± 0.09	2.012	ns
	J	0.65 ± 0.08	0.62 ± 0.04	0.63 ± 0.05	0.264	ns
	I	0.31 ± 0.02	0.31 ± 0.05	0.31 ± 0.04	0.002	ns
绒毛长度 Villus length	D	0.11 ± 0.02	0.15 ± 0.08	0.16 ± 0.06	0.339	ns
	J	0.12 ± 0.06	0.106 ± 0.027	0.11 ± 0.04	0.108	ns
	I	0.11 ± 0.03	0.14 ± 0.04	0.13 ± 0.03	0.583	ns
绒毛间距 Villus gap	D	0.027 ± 0.001	0.024 ± 0.003	0.025 ± 0.003	1.532	ns
	J	0.031 ± 0.003	0.029 ± 0.002	0.030 ± 0.003	0.948	ns
	I	0.026 ± 0.002	0.025 ± 0.006	0.025 ± 0.005	0.007	ns
绒毛表面积 Villus surface area	D	29 435.63 ± 4 721.91	31 757.13 ± 8 030.73	30 828.53 ± 6 376.32	0.073	ns
	J	38 205.31 ± 3 821.54	40 456.28 ± 2 373.06	39 555.89 ± 2 826.09	0.705	ns
	I	26 666.89 ± 4 884.83	25 956.15 ± 5 266.85	26 240.44 ± 5 075.83	0.005	ns
总绒毛表面积 Total villus surface area		94 307.83 ± 3 658.62	98 169.56 ± 20 222.41	96 624.87 ± 14 570.28	0.065	ns

D: 十二指肠; J: 空肠; I: 回肠. ns: 差异不显著 ($P > 0.05$); s: 差异显著 ($P < 0.05$). 长度单位: mm; 面积单位: mm^2 ; 统计数值: 平均值 ± 标准差

D: Duodenum; J: Jejunum; I: Ileum. ns: Non-significant ($P > 0.05$); s: Significant ($P < 0.05$). Measure of length: mm; Square measure: mm^2 ; Statistical data: Mean ± SD

3 讨论

消化道结构在动物的消化策略中起着关键作用, 直接决定动物从食物中获得营养物质和能量的效率(徐金会等, 2003), 小肠是动物进行食物消化和营养吸收的主要场所。研究表明, 甘肃鼯鼠通过缩小小肠(十二指肠、空肠和回肠)绒毛间距并增大空肠管径来增加小肠吸收表面积, 减缓食物通过小肠的速度, 提高小肠对食物的营养吸收和消化功能, 进而代偿其较短的小肠在能量吸收方面的不足。

食物条件和环境温度影响小哺乳动物取食和消化对策(Gross *et al.*, 1985; Green and Millar, 1987; Wunder, 1992)。在样本采集时发现, 甘肃鼯鼠分布地区土质多为砂土, 植被丰富, 其喜食的双子叶植物较多, 农耕区多为苜蓿、玉米和小麦。而高原鼯鼠分布地区属于高寒草甸, 植被贫瘠, 多为灌木, 沙棘等, 在沙棘之间散布着莎草科等单子叶植物。与甘肃鼯鼠相比, 生活于寒冷地区的高原鼯鼠(年均 1.2°C)可获得的食物数量和质量均较低, 致使其进化出较长的小肠以增加食物在小肠内的滞留时间和分解发酵时间, 进而充分吸收食物中的养分(郑光美和刘凌云, 1997; 杨传华等, 2012)。而甘肃鼯鼠则通过缩小小肠绒毛间距并增大空肠管径来应对缩短的小肠在能量消化和吸收方面的不足。这是两种鼯鼠在长期的进化选择中面对不同的生存环境而产生的适应性对策。

根据最优消化对策, 物种的消化道形态和结构应该是最优化的, 即物种的消化道能保证在最短的时间内, 用最小的消化道容积和最大的消化效率使能量和营养的净获得率最大(戈峰, 2002)。我们已知空肠是小肠消化和吸收营养物质的最主要场所(Booth, 1968; 张铁涛等, 2012), 甘肃鼯鼠通过增加空肠管径来提高肠道吸收表面积, 进而增强对食物的消化吸收功能, 是其在长期的进化选择过程中形成的最优的消化对策。

小肠绒毛长度和宽度是反映肠道营养吸收能力的重要指标。绒毛长度反映了肠道的功能状况, 其长度与细胞数量呈显著相关, 绒毛长时, 绒毛单位面积的成熟细胞多, 消化吸收功能增强; 反之, 绒毛短时, 成熟细胞少, 养分吸收功能弱(Caspary, 1992; 韩正康, 1993; 杨安峰, 1999)。研究表明, 甘肃鼯鼠十二指肠和空肠绒毛均较高原鼯鼠绒毛细长, 尽管缺乏统计学上的显著差异, 但该种趋势非常明显。同时, 大量的研究发现, 小哺乳动物在取

食高密度食物时, 绒毛长度趋于增加(Barry, 1976; 吴永杰等, 2008)。因此, 我们推测, 甘肃鼯鼠在长期的进化适应中, 小肠绒毛变得更加细长, 以代偿其较短的小肠在营养物质消化和吸收方面的不足。

致谢: 本实验显微切片制作及数据测量都是在兰州大学生命科学学院陈强教授实验室完成, 感谢陈强教授和岳丰博士的指导和热情帮助。

参考文献:

- Bao Y X, Du W G, Lin Z. 2001. Effect of temperature on energy requirement and food assimilation in Chinese White-Belliedrat (*Niviventer confucianus*). *Acta Zoologica Sinica*, **47** (5): 597 - 600. (in Chinese)
- Barry R E. 1976. Mucosal surface area and villous morphology of the small intestine of small mammals: functional interpretations. *Journal of Mammalogy*, **57**: 273 - 290.
- Baurhoo N, Brurhoo B, Mustafa A F, Zhao X. 2011. Comparison of corn-based and Canadian pearl millet-based diets on performance, digestibility, villus morphology, and digestive microbial populations in broiler chickens. *Poultry Science*, **90** (3): 579 - 586.
- Booth C C. 1968. Effect of location along the small intestine in absorption of nutrients. *Handbook of physiology*. Washington D. C.: The American Physiological Society, 1513 - 1527.
- Caspary W F. 1992. Physiology and pathophysiology of intestinal absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, **55** (suppl 1): 299 - 308.
- Du W G, Bao Y X, Liu J K. 2001. A comparison on length and weight of digestive tract among seven species of rodents (Muridae). *Acta Theriologica Sinica*, **21** (4): 264 - 270. (in Chinese)
- Duh G, Mouri N, Warburton D. 2000. EGF regulates early embryonic mouse gut development in chemically defined organ culture. *Pediatric Research*, **48** (6): 794 - 802.
- Fan N C, Shi Y Z. 1982. A revision of the zokors of subgenus *Eospalax*. *Acta Theriologica Sinica*, **2** (2): 180 - 199. (in Chinese)
- Ganessunker D, Gaskins H R, Zuckemann F A. 1999. Total parenteral nutrition alters molecular and cellular indices of intestinal inflammation in neonatal piglets. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, **23**: 337 - 344.
- Ge F. 2002. *Living Ecology*. Beijing: Science Press, 38 - 52. (in Chinese)
- Green D A, Millar J S. 1987. Changes in gut dimensions and capacity of *Peromyscus maniculatus* relative to diet quality and energy needs. *Canadian Journal of Zoology*, **65**: 2159 - 2162.
- Gross J E, Wang Z, Wunder B A. 1985. Effects of food quality and energy needs: changes in gut morphology and capacity of *Microtus ochrogaster*. *Journal of Mammalogy*, **66**: 661 - 667.
- Hammond K A, Wunder B A. 1991. The role of diet quality and energy need in the nutritional ecology of a small herbivore (*Microtus ochrogaster*). *Physiological Zoology*, **64** (2): 541 - 567.
- Kirkwood J K. 1991. Energy requirements for maintenance and growth of wild mammals, birds and reptiles in captivity. *Journal of Nutrition*, **121** (suppl 11): S29 - 34.

- Kisielinski K, Willis S, Prescher A, Klosterhalfen B, Schumpelick V. 2002. A simple new method to calculate small intestine absorptive surface in the rat. *Clinical and Experimental Medicine*, **2**: 131 - 135.
- Kleiber M. 1932. Body size and metabolism. *Hilgardia*, **11** (6): 315 - 353.
- Li Y. 1997. Vicissitudes of geographical distribution of *Myospalax* (*Eospalax*). *Journal of Shaanxi Normal University* (Natural Science Edition), **25** (sup): 42 - 47. (in Chinese)
- Luo Y P, Wang Q Q. 2012. Effects of body mass and temperature on routine metabolic rate of juvenile largemouth bronze gudgeon *Coreius guichenoti*. *Journal of Fish Biology*, **80**: 842 - 851.
- Munn A J, Banks P, Hume I D. 2006. Digestive plasticity of the small intestine and the fermentative hindgut in a marsupial herbivore, the tamar wallaby (*Macropus eugenii*). *Australian Journal of Zoology*, **54** (4): 287 - 291.
- Nabuurs M L. 1993. Villus height and crypt depth in weaned and unweaned pigs reared under various circumstances in the Netherlands. *Research in Veterinary Science*, **55**: 78 - 84.
- Norris R W, Zhou K Y, Zhou C Q. 2004. The phylogenetic position of the zokors (*Myospalacinae*) and comments on the families of murroids (*Rodentia*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, **31**: 972 - 978.
- Savage V M, Gillooly J F, Woodruff W H, West G B, Allen A P, Enquist B J, Uni Z, Noy Y, Sklan D. 2004. Posthatch changes in morphology and function of the small intestines in heavy and light-strain chicks. *Poultry Science*, **74**: 1622 - 1629.
- Tarachai P, Yamauchi K. 2000. Effects of luminal nutrient absorption, intraluminal physical stimulation, and intravenous parenteral alimentation on the recovery responses of duodenal villus morphology following feed withdrawal in chickens. *Poultry Science*, **79**: 1578 - 1585.
- Uni Z, Noy Y, Sklan D. 1995. Posthatch changes in morphology and function of the small intestines in heavy- and light-strain chicks. *Poultry Science*, **74** (10): 1622 - 1629.
- Wang D H, Wang Z W, Sun R Y. 1995. Variations in digestive tract morphology in root vole (*Microtus oeconomus*) and its adaptive significance. *Acta Theriologica Sinica*, **15** (1): 53 - 59. (in Chinese)
- Wang Y M. 1994. *Histological Technique of Zoology*. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 17. (in Chinese)
- West G B, Brown J H, Enquist B J. 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, **76**: 122 - 126.
- West G, Brown J H, Enquist B J. 1999. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, **284**: 677 - 679.
- Woodall P F. 1987. Digestive-tract dimensions and body-mass of elephant shrews (*Macroscelididae*) and the effects of season and habitat. *Mammalia*, **51** (4): 537 - 545.
- Wu F, Jing X Q, Wu S X, Li J, Xu J L. 1998. Isolation effect of enteral nutrition on small intestinal mucosal epithelial cells. *Parenteral and Enteral Nutrition*, **5** (2): 96 - 98. (in Chinese)
- Wu Y J, Yuan X Q, Hu J Z, Yang Y, Fang H, Wang J. 2008. Preliminary comparative anatomic study on digestive tract between *Crociodura attenuate* and *Apodemus agrarius*. *Journal of China West Normal University* (Natural Sciences), **29** (1): 16 - 19. (in Chinese)
- Wunder B A. 1992. Morphophysiological indicators of the energy state of small mammals. In: Tomasi T E, Horton T A eds. *Mammalian Energetics; Interdisciplinary Views of Metabolism and Reproduction*. Ithaca: Cornell University Press, 83 - 104.
- Xu J H, An S C, Tai F D. 2003. Relationship between digestive tract morphology and energy demands in the mandarin vole (*Microtus mandarinus*). *Acta Zoologica Sinica*, **49** (1): 32 - 39. (in Chinese)
- Yang A F. 1999. *Comparative Anatomy of Vertebrates*. Beijing: Beijing University Press, 163 - 164, 169. (in Chinese)
- Yang C H, Du Y R, Xie J X, Cui X F, Su J P, Zhang T Z. 2012. Morphological differences of internal organs in two species of zokor and their significance in classification. *Acta Theriologica Sinica*, **32** (3): 1 - 10. (in Chinese)
- Zhan T T, Cui H, Yue Z G, Yang Y, Gao X H, Yang F Q, Xing X M. 2012. Effect of dietary protein level on gastrointestinal digestive enzyme activity and jejunal morphology in minks during winter hair period. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, **24** (2): 376 - 382. (in Chinese)
- Zhang Y M, Zhang Z B, Liu J K. 2003. Burrowing rodents as ecosystem engineers: the ecology and management of plateau zokors *Myospalax fontanierii* in alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Mammal Review*, **33** (3): 284 - 294.
- Zhen G M, Liu L Y. 1997. *General Zoology* (Third Edition). Beijing: Higher Education Press, 561 - 568. (in Chinese)
- Zhou C Q, Zhou K Y. 2008. The validity of different zokor species and the genus *Eospalax* inferred from mitochondrial gene sequences. *Integrative Zoology*, **3**: 290 - 298.
- 王亚鸣. 1994. *动物组织学技术*. 南昌: 江西科学技术出版社, 17.
- 王德华, 王祖望, 孙儒泳. 1995. 根田鼠消化道长度和重量的季节变化及其适应意义. *兽类学报*, **15** (1): 53 - 59.
- 戈峰. 2002. *现代生态学*. 北京: 科学出版社, 38 - 52.
- 李瑛. 1997. *Eospalax* 亚属的地理分布变迁. *陕西师范大学学报* (自然科学版), **25** (增刊): 42 - 47.
- 伍烽, 金先庆, 吴仕孝, 李镜, 许嘉陵. 1998. 肠营养素对小肠粘膜上皮细胞分化的影响. *肠外与肠内营养*, **5** (2): 96 - 98.
- 杜卫国, 鲍毅新, 刘季科. 2001. 七种鼠科啮齿动物消化道长度和重量的比较. *兽类学报*, **21** (4): 264 - 270.
- 杨安峰. 1999. *脊椎动物比较解剖学*. 北京: 北京大学出版社, 163 - 164, 169.
- 杨传华, 都玉蓉, 谢久祥, 崔雪峰, 苏建平, 张同作. 2012. 两种鼯鼠内脏器官形态差异及其分类学意义. *兽类学报*, **32** (3): 1 - 10.
- 吴永杰, 袁兴勤, 胡锦鑫, 杨艳, 方慧, 王俊. 2008. 灰麝鼯与黑线姬鼠消化道解剖初步比较. *西华师范大学学报* (自然科学版), **29** (1): 16 - 19.
- 张铁涛, 崔虎, 岳志刚, 杨颖, 高秀华, 杨福全, 邢秀梅. 2012. 饲料蛋白质水平对冬毛期水貂胃肠道消化酶活性以及空肠形态结构的影响. *动物营养学报*, **24** (2): 376 - 382.
- 郑光美, 刘凌云. 1997. *普通动物学* (第三版). 北京: 高等教育出版社, 561 - 568.
- 徐金会, 安书成, 邵发道. 2003. 棕色田鼠消化道形态变化与能量需求的关系. *动物学报*, **49** (1): 32 - 39.
- 韩正康. 1993. *家畜营养生理学*. 北京: 农业出版社, 40 - 50.
- 鲍毅新, 杜卫国, 林治. 2001. 环境温度对社鼠能量需求和食物同化的影响. *动物学报*, **47** (5): 597 - 600.
- 樊乃昌, 施银柱. 1982. 中国鼯鼠 (*Eospalax*) 亚属分类研究. *兽类学报*, **2** (2): 180 - 199.