

圈养高山麝种群年龄组的粪便光谱判别

刘志霄^{1,*}, 梁 亮^{1,2}, 邓凯东¹, 丁宇晶¹, 潘世成³, 张学炎³, 郝 欣³

(1. 吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首 416000; 2. 中南大学信息物理工程学院, 湖南长沙 410083;

3. 甘肃兴隆山国家级自然保护区管理局, 甘肃榆中 730117)

摘要:提出了一种利用粪便可见-近红外反射光谱进行圈养高山麝种群年龄组分析的新方法。以 FieldSpec® 3 地物光谱仪采集了 145 份高山麝粪便(成体麝粪样 45 份,亚成体和幼体各 50 份)的光谱数据,将其随机分成训练集(100 份)和检验集(45 份)。光谱经 S. Golay 平滑和一阶导数处理后以主成分分析法(PCA)降维。以前 6 个主成分(含原始光谱 95.00% 的特征信息)作为新变量,利用训练集样本,分别以 Fisher 线性判别、Bayes 逐步判别以及 BP-神经网络(BP-ANN)3 种方法建立高山麝种群年龄组的分析模型。对检验集 45 个未知样的预测表明,BP-ANN 模型判别的准确率最高,为 84.44%。3 种方法所建的模型对幼麝粪样判别的准确率最高,可达 93.33%。分析发现亚成体粪样具有过渡性质,但幼麝粪样与成体粪样易于判别。结果表明,利用粪便的可见-近红外反射光谱进行高山麝年龄组的快速、非接触性判别是可行的,且 PCA 结合 BP-ANN 判别是一种优选方法。

关键词:高山麝;种群年龄组;粪便;可见-近红外反射光谱;判别模型

文章编号:1000-0933(2009)12-6407-07 中图分类号:Q958.1 文献标识码:A

Differentiation of population age groups of captive alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) based on the visible-near infrared reflectance spectra of their feces

LIU Zhi-Xiao^{1,*}, LIANG Liang^{1,2}, DENG Kai-Dong¹, DING Yu-Jing¹, PAN Shi-Cheng³, ZHANG Xue-Yan³, HAO Xin³

1 College of Biology and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, China

2 School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha, 410083, China

3 Administration of Xinglongshan National Nature Reserve of Gansu Province, Yuzhong 730117, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6407 ~ 6413.

Abstract: A new method was developed to analyze the population age groups of the captive Alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) based on the visible-near infrared reflectance spectra of their feces. A total of 145 feces samples including 50, 50 and 45 from fawns, subadults and adults, respectively, were collected at Xinglongshan Musk Deer Farm, Gansu Province. The spectral scanning on the samples was carried out in a darkroom (18 — 22℃, 22% — 25% humidity and a special halogen lamp as the sole light source) with an ASD FieldSpec® 3 spectrometer. The spectral data were assigned randomly to two sets for calibration (100 data) and validation (45 data) each. The data were pretreated by the methods of S. Golay smoothing and the first derivative. The pretreated spectra were analyzed by principal component analysis (PCA), and the resultant top 6 principal components, which accounted for 95.00% of the variation among original spectral data, were used as the inputs for modeling. Individual calibration models were developed for differentiation of the population age groups of Alpine musk deer by Fisher linear discriminant (FLD), Bayes stepwise discriminant (BSD) or Back-propagation artificial neural network (BP-ANN). The predicted outcomes from the validation models of the 45 sample spectral data

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30570279);中南大学研究生创新项目(1343-74334000022);中南大学拔尖博士研究生学位论文创新项目(1960-71131100007);中南林业科技大学林业遥感信息工程研究中心开放性研究基金资助项目(RS2008k03)

收稿日期:2009-06-11; 修订日期:2009-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zliu1965@163.com

indicated that the accuracy rates of prediction were 84.44%, 82.22% and 80.00% for BP-ANN, BSD and FLD, respectively. The highest differentiation accuracy of 93.33% was achieved in the fawns among the three age groups. The differences in the fecal spectra among the three age groups revealed the component diversity of the feces, which corresponded with the ontogenetic development of the digestive system of Alpine musk deer. The fecal samples of subadults were of transitional attributes, but those of fawns or adults were readily differentiated by the models. The results suggested that visible-near infrared reflectance spectra of feces was a rapid and non-invasive method for distinguishing the population age groups of Alpine musk deer, and the PCA combined with BP-ANN was a preferred method.

Key Words: alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*); population age groups; feces; visible-near infrared reflectance spectra; differentiation models

种群年龄结构分析,是对动物种群进行深入研究和科学管理的基础性工作,一般可通过对样本外部形态及内部构造的特征观察和度量比较^[1~4]以获取整个种群的年龄结构,但这些接触性或损伤性的方法对于珍稀、孤居、胆怯的麝类动物有很大的局限性,因此探索切实可行的非损伤性取样^[5]方法具有现实意义。动物粪便是对动物进行非损伤性研究的良好材料,已被广泛用于分析动物的食物组成与食物质量,获取有关动物生理、病理、生境利用及分布密度等信息^[6~11],因此,可考虑利用麝的粪便以获取其年龄结构的相关信息。

高山麝(*Moschus chrysogaster*)属脊椎动物亚门,哺乳纲,偶蹄目,麝科,系国家一级保护动物,也是我国最珍稀的药用动物资源之一,主要分布于青藏高原及其毗邻山地。刘志霄等曾采用粪堆计数法估算高山麝的种群数量^[12],提出成、幼麝的粪粒存在差异,可用于区分野生麝的成体和幼体^[13]。不同年龄阶段的麝,对食物的消化与吸收功能存在差异^[14],其粪便的组成必然不同,应带有可进行年龄阶段区分的特征信息。近年,在混合物特征信息提取方面,可见-近红外反射光谱结合模式识别技术的应用日益广泛^[15],已在中药材、农副产品等分析方面^[16~22]取得满意结果。因此,本文将遥感领域的地物光谱分析技术引入种群生态研究,通过对粪样可见-近红外反射光谱的获取与特征分析来实现对动物年龄阶段的区分,旨在建立高山麝幼体、亚成体与成体的判别模型,为高山麝种群年龄组的快速、非损伤性判别提供一条新的研究途径。

1 研究方法

1.1 实验仪器

实验所用的 FieldSpec® 3 地物光谱仪,是美国 ASD(Analytical Spectral Device)公司产品,波长范围为 350~2500nm;光谱分辨率 3nm@700 nm/10nm@1400, 2100nm;波长精度 ± 1 nm;波长重复性优于 ± 0.3 nm@ $\pm 10^\circ\text{C}$ 温度变化;采样时间短至 10 次/s;光谱平均高达 31 800 次;探测器响应线性 $\pm 1\%$;重量约为 5kg。

1.2 粪样采集与预处理

于 2006 年 11 月至 2007 年 6 月,在甘肃兴隆山国家级自然保护区高山麝驯养场采集样品。整个采样期间麝场各圈舍的饲喂条件相同,饲料组成基本一致,日粮分为干饲料、块茎饲料与精饲料 3 部分,幼麝不另配饲料,3 月后断奶,日粮组成与成体麝相同。采样者于隐蔽处用望远镜观察麝群,一旦发现其排粪,随即以肢体语言引导饲养员用塑料小勺将新鲜粪样装入塑料自封袋,记录麝的编号、年龄、性别等基本信息后,利用冬天冰雪自然冻存或在冰箱中冻存。塑料小勺用完后洗净擦干,以防样品间交叉污染。共获取健康个体正常粪样 145 份(分别来自 92 头麝,且同一头麝的粪样不超过 2 份),其中成体(2.5 岁以上)45 份,亚成体(1~2.5 岁)与幼体(1 岁以内)各 50 份。随机抽取 45 份(每个年龄组各 15 份)作为检验集,其余的 100 份作为训练集。

光谱采集前,先用干净镊子将粪样采集过程中夹杂的异物清除。为降低样品表面状况对光谱的影响,保证样品表面平整度及密度的一致性,在光谱采集前将粪样捣碎至均匀后,倒入半径 2cm,高 3cm 的圆筒形粪样压制模(自制)内,将其压制为上表面平整、质地均一的圆饼状粪样。

1.3 光谱采集与光谱数据的预处理

光谱采集于暗室内(18~22℃,湿度22%~25%)进行,以光谱仪专用的卤素灯为唯一光源。选用3℃视场角探头,光源和光纤探测器头部均以45°角对准样品,探测器头部下端距离粪样0.5 cm,每一粪样重复测量30次,取平均值。

光谱数据在ASD ViewSpec Pro中以ASCII码形式导出,再导入Unscrambler 9.7中进行处理。光谱经S. Golay平滑后,进行一阶导数处理,以消除基线漂移等因素对光谱产生的影响。由于光谱在500 nm以前与2300 nm以后噪声较大,因此本研究选用500~2300 nm范围的光谱波段作为有效光谱数据进行分析。

1.4 光谱数据降维

如果将光谱数据直接作为变量输入进行建模,不但会因变量太多而增加建模难度,而且会引入噪声而降低预测精度。为了消除噪声,提高信噪比,本研究在Unscrambler 9.7中采用主成分分析(PCA)以实现光谱数据的降维。数据经PCA降维后,既能有效除噪,又可最大限度地保留原始数据的结构特征,从而使降维所得的新变量不丢失有价值的信息。

1.5 建模方法

为获得适当的建模方法,在DPS(Data Processing System)9.50^[23]中分别采用Fisher线性判别、Bayes逐步判别和BP-ANN 3种方法对样本进行建模分析。训练过程中,BP-ANN各层间采用Sigmoid激励函数,网络结构设置为9-6-3三层,迭代次数设置为1000次;Bayes多类逐步判别的临界值 F 取1.81;Fisher多类线性判别则直接进行分析。

2 结果与分析

2.1 高山麝粪样的可见-近红外反射光谱

高山麝粪便的可见-近红外反射光谱曲线(图1),在350~500 nm波段较为平缓,在500 nm处开始上升,经670 nm处的波谷后迅速升至峰值。此后光谱曲线起伏较大,在1280 nm以后总体呈下降的趋势。在1180、1450 nm与1930 nm附近有较强的光吸收。图1中各反射光谱的波形虽稍有差异,但仅凭肉眼无法区分成体、亚成体与幼体样本,因此需要采用数学方法进行特征信息分析。

2.2 PCA分析与特征信息提取

本文选用500~2300 nm波段作为有效光谱数据进行分析,其光谱数据维度达1801维,需进行降维分析。将有效光谱导入Unscrambler 9.7中,经S. Golay平滑,并进行一阶导数处理后,利用其PCA模块实现光谱维度的压缩。各样本经PCA降维后,分别以前3个主成分PC_1、PC_2、PC_3(累积方差贡献率为89.17%)作为 x 、 y 、 z 坐标轴,建立各样本的三维得分图(图2),以表征不同类型样本的聚类结果。从图2可见,幼体、亚成体与成体样本都具有一定的聚类趋势,但亚成体与成体样本的交叉较多,因此要取得更为满意的判别效果,还需采用更多的主成分以建立判别能力更强的模型。

在下一步建立模型的过程中,如果所选取的主成分过少,将会损失某些变量的信息,因不充分拟合而导致模型预测准确度降低;而若选用的主成分过多,则会将光谱中的噪声信息引入模型,产生过拟合现象,也会导致模型预测的准确率下降。本研究中通过交互验证确定最佳主成分数,即在累积可信度(累积方差贡献)变化不大的情况下选取较少的主成分数。光谱进行PCA分析后,前12个主成分的累积可信度如图3所示。其中前6个主成分的累积可信度达95.00%,已包含了光谱数据绝大部分的特征信息。

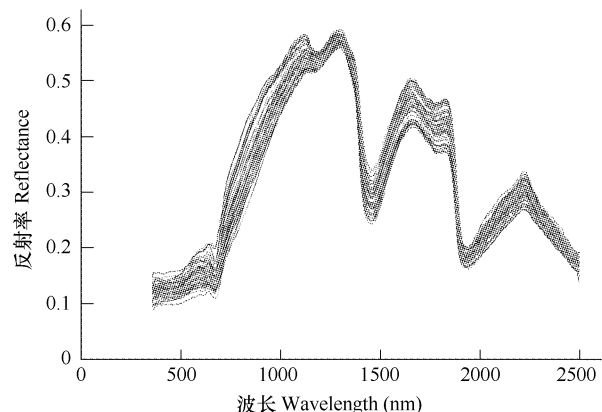


图1 所有高山麝粪样的可见-近红外反射光谱

Fig. 1 The visible-near infrared reflectance spectra of all fecal samples from *Moschus chrysogaster*

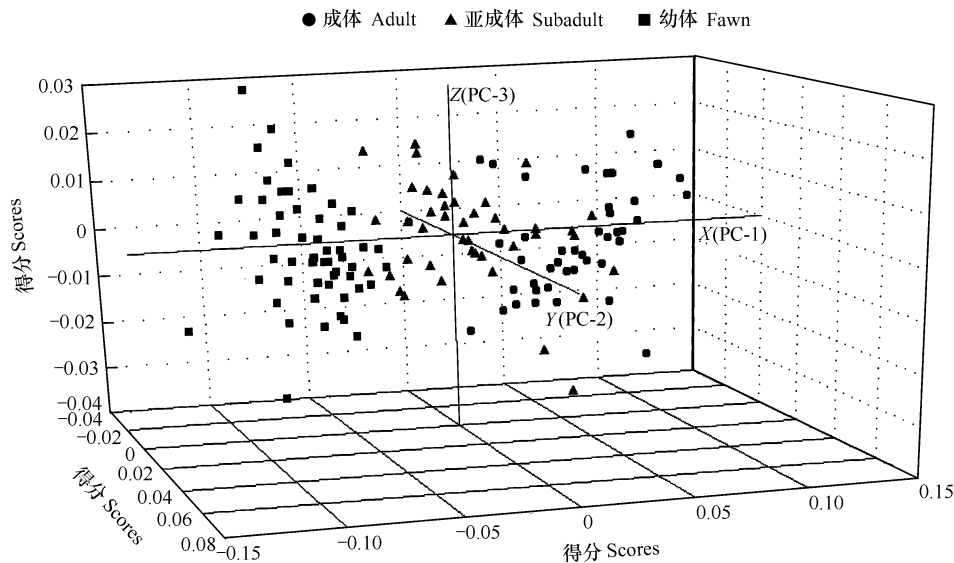


图2 所有样本的前3个主成分 PC-1、PC-2 与 PC-3 的得分聚类

Fig. 2 Score cluster plots of top three principal components PC-1, PC-2 and PC-3 for all samples

2.3 三类模型的判别

将幼体、亚成体和成体的样本分别赋值为 1、2 和 3, 利用训练集中的 100 份样本, 以 PCA 降维得到的前 6 个主成分(累积可信度为 95.00%) 作为输入变量, 分别利用 Fisher 线性判别、Bayes 逐步判别和 BP-ANN 3 种算法建立判别模型。BP 网络各层间采用 Sigmoid 激励函数, 其中 Sigmoid 参数取 0.9, 动态参数取 0.6, 最小训练速度设为 0.1, 允许误差设为 0.0001, 最大迭代次数设为 3000 次, 网络结构经反复验证后设为 6-4-1 三层。Bayes 逐步判别取 $F = 1.94$ 作为变量引入的临界值, Fisher 线性判别则直接进行分析。各方法判别模型的具体参数见表 1, 其中 BP-神经网络列出了隐含层与输出层的各节点的权重矩阵, Fisher 多类判别与 Bayes 逐步判别则列出了判别函数。

判别分析时, 对样本进行类别归属判定的规则为: BP-ANN 根据模型的计算结果判定, 结果小于 1.5 判定为幼体, 在 1.5 至 2.5 之间判定为亚成体, 大于 2.5 判定为成体; Fisher 多类线性判别与 Bayes 逐步判别则根据判别函数计算的结果分别得出各样本对幼体、亚成体与成体 3 种类别归属的概率, 并在 3 种类别中选取概率值最大的作为判定类别。

各模型对训练集样本的拟合结果和对检验集样本的预测结果如表 2 所示。对 3 种方法的对比分析可知, 无论是对训练集的拟合结果还是对检验集的预测结果, BP-ANN 均具有最高的精度, 总体准确率分别为 90.00% 和 84.44%, 是一种优选方法。另一方面, 3 种方法所建模型对幼体粪样判别的准确率最高, 其中对训练集的拟合结果准确率达 91.43% ~ 94.29%, 对检验集的预测结果准确率达 86.67% ~ 93.33%。且进一步分析发现, 在所有误判的样本中, 成体的误判均系将其误判为亚成体; 亚成体的误判却一部分被误判为成体(占 66.67%), 另一部分被误判为幼体(占 33.33%), 而幼体的误判则均系被误判为亚成体。这说明亚成体的粪样具有过渡性质, 而幼体粪样和成体粪样易于区分。

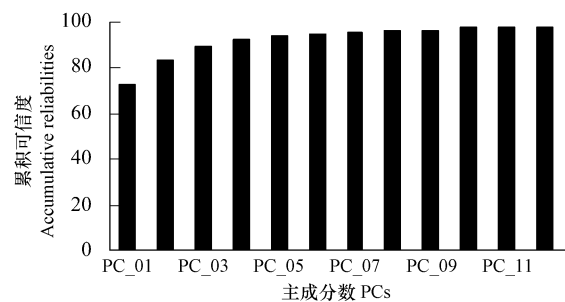


图3 PCA 前 12 个主成分的累积可信度

Fig. 3 Accumulative reliability plots of the top 12 principal components of PCA

表 1 3 种方法的判别模型

Table 1 Discriminant models developed by three methods

方法 Method	模型 Model				
	隐含层权重 Hidden layer weights of each node				输出层权重 Output layer weights
BP-神经网络判别	-0.0599	10.8295	-6.1239	-10.1083	11.2426
Back-propagation artificial neural network discriminant	1.9804	-0.2101	-4.2019	4.9059	
	-2.5900	0.3690	5.9926	2.2782	-9.8130
	-4.9090	-7.1463	3.9527	-4.8198	
	1.8156	7.0908	7.0502	4.1789	7.8657
	-0.0904	-3.3300	-8.3096	-4.5338	-8.3791
Fisher 判别 Fisher linear discriminant	$y_{\text{成体}} = -4.4342 + 7.2887x_1 + 1.9351x_2 - 0.1706x_3 + 1.8196x_4 - 0.0883x_5 + 0.2250x_6$				
	$y_{\text{亚成体}} = -0.8378 + 1.1972x_1 + 1.4907x_2 + 0.1905x_3 + 1.4910x_4 + 0.9086x_5 + 0.0745x_6$				
	$y_{\text{幼体}} = -1.6168 - 1.1738x_1 + 0.5218x_2 + 1.2247x_3 + 1.9322x_4 + 1.7711x_5 + 1.2373x_6$				
Bayes 逐步判别 Bayes stepwise discriminant	$y_{\text{成体}} = -2.6444 + 5.1116x_1 - 1.1280x_5$		入选变量为 x_1 与 x_5 , 其余变量均被剔除		
	$y_{\text{亚成体}} = -0.0099 + 0.2558x_1 + 0.0417x_5$		The variables x_1 and x_5 were selected,		
	$y_{\text{幼体}} = -3.5135 - 5.9465x_1 + 1.0640x_5$		others were removed		

表 2 3 种方法对训练集与检验集样本判别的准确率

Table 2 Discrimination accuracy rates for samples from calibration and validation sets by three methods (%)

方法 Method	训练集 Calibration set				检验集 Validation set			
	成体 Adult	亚成体 Subadult	幼体 Fawn	总体 Total	成体 Adult	亚成体 Subadult	幼体 Fawn	总体 Total
Fisher 线性判别 Fisher linear discriminant	80.00	77.14	94.29	84.00	73.33	80.00	86.67	80.00
Bayes 逐步判别 Bayes stepwise discriminant	86.67	80.00	91.43	86.00	80.00	73.33	93.33	82.22
BP-神经网络 Back-propagation artificial neural network	90.00	85.71	94.29	90.00	80.00	80.00	93.33	84.44

3 讨论

Green 曾在印度进行了为期 2a 的比较系统的麝粪便的分析研究,认为麝粪中化学组成(如木质素、纤维素、半纤维素和细胞可溶物等)的季节性变化是与当地物候的变化密切相关的,并且在一定范围内,麝粪中粗蛋白和木质素的水平可能是食物质量最可靠的指标^[24],因此基于粪样进行麝的种群生态研究,必须考虑食物条件的变化及影响。然而本研究是在养麝场进行的,取样期间各麝之间的食物条件基本一致,因此粪样间的差异主要反映的是麝消化生理上的不同。

动物粪便成分非常复杂,它包含了丰富的动物生物学信息。利用地物光谱仪,测量粪便的光谱反射率,得到的是粪便的综合信息。自然光照或人工光照照射粪便,由于粪便中存在光吸收物质,因此,某些波段会被不同程度的吸收,另一些波段则会出现不同程度的反射,粪样组成成份的不同必然会有不同的光谱反射率特征曲线,且在粪便成分不变的情况下相对稳定。因此,可利用光谱反射率特征曲线的差异区分不同的粪样。本研究结果表明,利用粪便的可见-近红外光谱信息特征可以快速、非接触性地判别高山麝种群中的幼体、亚成体和成体,且 PCA 结合 BP-ANN 是一种优选方法。并且,利用粪样可见-近红外反射光谱判别幼麝的准确率明显高于成体与亚成体,这与用形态指标鉴定海南坡鹿年龄所取得的结果^[25]类似,但李玉春等人是利用坡鹿幼体粪粒形态上与亚成体、成体有较大差异而得出的结论。而在本研究中,所有的样品均已压制成表面平整一致的圆饼状,因此所得结果反映了粪样组成成分上的差异,相对而言可更好地避免人为主观因素的干扰。幼体的消化系统处于发育过程中,对食物的消化和吸收功能与成体差异较大,因此其粪便的组分与成体相比有较大差异。而亚成体的消化系统发育趋于完善,其消化与吸收功能趋向成体,因此其粪便的组成总体上具有过渡的性质。

值得注意的是,本研究所用的地物光谱仪是遥感领域中的核心设备之一,与化学领域通常用于光谱分析的傅立叶近红外光谱仪相比,虽然其光谱分辨率还有待提高,但它具有体积小、重量轻、可随身携带;光谱范围宽,操作快捷简便,稳定性和重复性好等特点,非常适合于野外研究。并且由于地物光谱仪能在较大的光谱区间内连续扫描,使得人们可以非常方便地描绘地物光谱细节,研究地物光谱特性及选择最佳工作波段。事实上,利用地物光谱仪识别矿物^[26]、研究作物的水分状况^[27]和叶绿素、全氮、可溶性糖等营养参数以及水生植物的光合特性^[28,29]已成为近年国际遥感领域的一个研究热点。当然,本文将地物光谱分析技术引入麝的研究是一种尝试,一个判别效果更好的稳健模型的构建还需要做更多的工作。而且,如果将这一技术应用于野生种群的研究,粪样的化学成分可能会因受到微生物活动和天气等因素的影响而有所改变,因此必须综合考虑排粪时间、粪场周围条件,以及采样时间、粪样贮存、天气等情况。

References:

- [1] Yang H F. A brief comment on Age Determination Methods for Small mammals. Chinese Journal of Ecology, 1990, 9(2): 54—55.
- [2] Lu X, Shen S Y, Gao S W. Determination of age and analysis of population structure in cape hare (*Lepus capensis*). Acta Theriologica Sinia, 1994, 14(3): 176—183.
- [3] Zhao T B, Zhang Z B, Zhang C F, Qi L, Wu J P. Age identification and structure of *Rhombomys opimus* population. Acta Theriologica Sinia, 2002, 22(1): 77—80, 60.
- [4] Li J, Abulimit A. Study on the age identification and the population age composition of *Meriones libycus*. Arid Zone Research, 2007, 24(1): 43—48.
- [5] Li M, Wei F W, Rao G, Fang S G, Feng Z J. Application of noninvasive sampling in conservation genetics. Acta Zoologica Sinica, 2001, 47(3): 338—342.
- [6] Millsapugh J J, Woods R J, Hunt K E, Raedeke K J, Brundige G C, Washburn B E, Wasser S K. Using fecal glucocorticoid assays to study the physiological stress response of elk. Wildlife Society Bulletin, 2001, 29(3): 899—907.
- [7] Liang L, Liu Z X, Pang S C, Zhang X Y, Bai Z Q, Wang C H, Yang M H. Diagnosis of chronic enteritis of alpine musk deer (*Moschus Chrysogaster*) based on visible-Near infrared reflectance spectra of feces. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(7): 1772—1776.
- [8] Pichner R, Sander A, Steinrück H, Gareis M. Occurrence of *Salmonella* spp. and shigatoxin-producing *Escherichia coli* (STEC) in horse feces and horse meat products. Berl Munch Tierarztl Wochenschr, 2005, 118(7-8): 321—325.
- [9] Alvarez C S, Gallina S, Gallina T P, Dominguez C R. Habitat availability for the mule deer (*Cervidae*) population in a relicual oak-pine forest in Baja California Sur, Mexico. Tropical Zoology, 1999, 12(1): 67—78.
- [10] Sanchez R G, Gallina S. Mule deer (*Odocoileus hemionus*) density in a landscape element of the Chihuahuan desert, Mexico. Journal of Arid Environments, 2000, 44(3): 357—368.
- [11] Wei R P, Zhang G Q, Wang P Y, Li D S, Cao J L. Relation of bite size in feces with age and population number of Giant Panda (*Ailuropodam elanoleuca*). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (10): 2153—2162.
- [12] Liu Z X, Sheng H L, Li Y G, Wang Z D, Zhao D H, Du H P. The current status and conservation of the isolated population of alpine musk deer (*Moschus chrysogaster*) at Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 463—467.
- [13] Liu Z X, Li Q, Kang F G, Sheng H L. Some ecological characteristics of the isolated population of Alpine Musk Deer (*Moschus chrysogaster*) in the Xinglong forest, Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 964—968.
- [14] Sheng H L, Liu Z X. The Musk deer in China. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2007. 45—141.
- [15] Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. Present situation and prospect of near infrared spectrometer in China and abroad. Analytical Instrumentation, 2006, (2): 1—10.
- [16] Liu G L, Cai J N, Li W, Wang Z T, Zou Q G, Xu L S, Xiang B R. Near-infrared spectroscopy technique used in the classification of the *Cnidium monnieri* (L.) Cusson. Computer and Applied Chemistry, 2000, 17(2): 109—110.
- [17] Wu Y J, Li W, Xiang B R, Shu P, Wang, N H, Yuan C Q. Identification of traditional Chinese medicine Baizhi with near-infrared spectrum. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2001, 24(1): 26—28.
- [18] Wang H L, WAN X Y, Hu P S, Zhai H Q, Wang J M. Quantitative analysis of fat content in brown rice by near infrared spectroscopy (NIRS) technique. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1540—1546.
- [19] Liu X H, Zhang X Q, Sun S Q. Auto-discrimination and characteristic wave band selection of Chinese traditional medicine origin based on near infrared spectra. China Science Bulletin, 2005, 50(4): 393—398.
- [20] Bi J C, Zhang W W, Xiao Y H, Wang H L, Jiang L, Liu L L, Wan X Y, Zhai H Q, Wan J M. Analysis for protein content in rice by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) technique. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(15): 709—715.

- [21] Han L L, Mao P S, Wang X G, Wang Y H. Study on vigour test of oat seeds with near infrared reflectance spectroscopy. *Journal Infrared Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 86—90.
- [22] Liu Y D, Lou J, Chen X M. Analysis of soluble solid content in Nanfeng mandarin fruit with visible near infrared spectroscopy. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 119—122.
- [23] Tang Q Y, Feng M G. DPS data processing system — experimental design, statistical analysis and data mining. Beijing: Sience Press, 2007. 712—768, 1056—1069.
- [24] Green M J B. Diet composition and quality in Himalayan musk deer based on fecal analysis. *Journal of Wildlife Management*, 1987, 51(4): 881—892.
- [25] Li Y C, Meng Y H, Gao H B, Sun R F, Zhang H, Lin X M, Li S Y. A study on determining age and sex of Hainan eld's deer by use of pellet morphometry. *Zoological Research*, 2008, 29(2): 189—194.
- [26] Zhang Z G, Wang R S, Guo X F, Gan F P, Yang S M. Mineral recognition method by spectrometry remote sensing based on material spectral characteristic. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 437—443.
- [27] Tian Q J, Gong P, Zhao C J, Guo X W. A feasibility study on diagnosing wheat water status using spectral reflectance. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(8): 666—669.
- [28] Wang K, Shen Z Q, Wang R C. Effects of nitrogen nutrition of the spectral reflectance characteristics of rice leaf and canopy. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1998, 24(1): 93—97.
- [29] Rees W G, Tutubalina O V, Golubeva E I. Reflectance spectra of subarctic lichens between 400 and 2400nm. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 281—292.

参考文献:

- [1] 杨荷芳. 小型兽类年龄鉴定方法简评. *生态学杂志*, 1990, 9(2): 54~55.
- [2] 卢欣, 申守义, 高尚文. 草兔的年龄鉴定和种群的年龄结构分析. *兽类学报*, 1994, 14(3): 176~183.
- [3] 赵天飙, 张忠兵, 张春福, 齐林, 郭建平. 大沙鼠的年龄鉴定与种群年龄组成. *兽类学报*, 2002, 22(1): 77~80, 60.
- [4] 李俊, 阿布力米提·阿不都卡迪尔. 红尾沙鼠的年龄鉴定及种群年龄组成. *干旱区研究*, 2007, 24(1): 43~48.
- [5] 李明, 魏辅文, 饶刚, 方盛国, 冯祚建. 非损伤性取样法在保护遗传学研究中的应用. *动物学报*, 2001, 47(3): 338~342.
- [7] 梁亮, 刘志霄, 潘世成, 张学炎, 白振清, 汪承华, 杨敏华. 基于粪便可见-近红外反射光谱的高山麝慢性肠炎诊断. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(7): 1772~1776.
- [11] 魏荣平, 张贵权, 王鹏彦, 李德生, 曹家林. 大熊猫粪便中竹子咬节长短与年龄和种群数量关系. *生态学报*, 2003, 23(10): 2153~2162.
- [12] 刘志霄, 盛和林, 李元广, 王绍统, 赵登海, 杜和平. 贺兰山林区马麝隔离种群的生存现状及保护. *生态学报*, 2000, 20(3): 463~467.
- [13] 刘志霄, 李强, 康发功, 盛和林. 兴隆山林区马麝隔离种群的生态特征. *生态学报*, 2001, 21(6): 964~968.
- [14] 盛和林, 刘志霄. *中国麝科动物*. 上海: 上海科学技术出版社, 2007. 45~141.
- [15] 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近红外光谱仪国内外现状与展望. *分析仪器*, 2006, (2): 1~10.
- [16] 刘国林, 蔡金娜, 李伟, 王峥涛, 邹巧根, 徐珞珊, 相秉仁. 近红外光谱技术在中药蛇床子分类中的应用. *计算机与应用化学*, 2000, 17(2): 109~110.
- [17] 吴拥军, 李伟, 相秉仁, 舒璞, 王年鹤, 袁昌齐. 近红外光谱技术用于白芷类中药的鉴定研究. *中药材*, 2001, 24(1): 26~28.
- [18] 王海莲, 万向元, 胡培松, 翟虎渠, 万建民. 稻米脂肪含量近红外光谱分析技术研究. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1540~1546.
- [19] 刘沐华, 张学工, 孙素琴. 中药材产地的近红外光谱自动鉴别和特征谱段选择. *科学通报*, 2005, 50(4): 393~398.
- [20] 毕京翠, 张文伟, 肖应辉, 王海莲, 江玲, 刘玲珑, 万向元, 翟虎渠, 万建民. 应用近红外光谱技术分析稻米蛋白质含量. *作物学报*, 2006, 32(15): 709~715.
- [21] 韩亮亮, 毛培胜, 王新国, 王玉红. 近红外光谱技术在燕麦种子活力测定中的应用研究. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2): 86~90.
- [22] 刘燕德, 罗吉, 陈兴苗. 可见-近红外光谱的南丰蜜桔可溶性固形物含量定量分析. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2): 119~122.
- [23] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘. 北京: 科学出版社, 2007. 712~768, 1056~1069.
- [25] 李玉春, 蒙以航, 高海波, 孙蕊芬, 张海, 林贤梅, 李善元. 用粪粒外部形态指标鉴定海南坡鹿的性别与年龄. *动物学研究*, 2008, 29(2): 189~194.
- [26] 张宗贵, 王润生, 郭小方, 甘甫平, 杨苏明. 基于地物光谱特征的成像光谱遥感矿物识别方法. *地学前缘*, 2003, 10(2): 437~443.
- [27] 田庆久, 官鹏, 赵春江, 郭小维. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析. *科学通报*, 2000, 45(24): 2645~2650.
- [28] 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 水稻氮素营养对叶片及冠层反射光谱特性的影响(英文). *浙江农业大学学报*, 1998, 24(1): 93~97.