

干旱地区核设施周围陆生昆虫—蒙古束颈蝗 剂量系数估算

贡文静 张超 张晟 王慧娟 曹俏 原寒 李建国 韩宝华

(中国辐射防护研究院 太原 030006)

摘要 为了研究我国干旱地区核设施附近代表性生物剂量系数,以蒙古束颈蝗(*Sphingonotus mongolicus* Saussure)为例,基于解剖学和几何学建立简化解剖学模型和基于CT断层扫描、Photoshop软件及Python编程等建立体素模型,并分别计算环境介质中⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗不同组织和器官的内外照射剂量系数。为了验证本次计算结果的可行性,将计算结果与ICRP 108号报告进行了比较。由于ICRP 108号出版物采用整体简化模型,因此本文计算结果采用各个器官剂量系数总体平均值。结果显示:⁹⁰Sr对蒙古束颈蝗简化解剖学模型内外照射剂量系数分别为 $6.59 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $6.74 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; ¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗简化解剖学模型内外照射剂量系数分别为 $1.34 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $4.40 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; ⁹⁰Sr对蒙古束颈蝗体素模型内外照射剂量系数分别为 $7.87 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $6.74 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; ¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗体素模型内外照射剂量系数分别为 $1.33 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $3.51 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; ICRP 108号出版物中提供的⁹⁰Sr对参考昆虫的内外照射剂量系数分别为 $1.00 \times 10^{-2} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $3.90 \times 10^{-10} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; ICRP 108号出版物中提供的¹³⁷Cs对参考昆虫的内外照射剂量系数分别为 $3.20 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 、 $2.80 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 。根据以上数据比较,ICRP 108号报告中提供的内照射剂量系数均比本文建立的剂量学模型计算结果大,外照射剂量系数均小,这可能与生物的体型及采用放射性核素衰变粒子及能量有关。本文采用接近生物体形态的简化解剖学模型及与生物体高度重合的体素模型,更加接近于生物体真实受照情况,精确度高、误差小,证明本次建立的昆虫剂量学模型可行。

关键词 蒙古束颈蝗,简化解剖学模型,体素模型,剂量系数

中图分类号 TL7, TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0049

Dose coefficient estimation for terrestrial *Sphingonotus* insects near nuclear facilities in Northwest China

GONG Wenjing ZHANG Chao ZHANG Sheng

WANG Huijuan CAO Qiao YUAN Han LI Jianguo HAN Baohua

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

ABSTRACT To study the representative dose coefficients near nuclear facilities in the arid regions of Northwest China, a simplified anatomical model of *Sphingonotus* insects using computed tomography (CT) scanning is proposed. In addition, a voxel model created by using Photoshop and Python is used to assess the results of the simplified anatomical model. The dose coefficients of internal and external ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs irradiation on different

第一作者: 贡文静,女,1994年出生,2020年获中国辐射防护研究院硕士学位,从事辐射剂量学、放射生态学相关研究工作
通信作者: 李建国,博士,研究员, E-mail: lijianguo@cirp.org.cn

收稿日期: 初稿 2022-04-26; 修回 2022-06-13

First author: GONG Wenjing (female) was born in 1994, and obtained her master's degree from China Institute for Radiation Protection in 2020, engaged in the radiation dosimetry and radioecology

Corresponding author: LI Jianguo, doctoral degree, professor, E-mail: lijianguo@cirp.org.cn

Received 26 April 2022; accepted 13 June 2022

organs of *Sphingonotus* insects in the environmental medium are calculated. To verify the feasibility of the proposed model, the results are compared with the dose coefficients reported in the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 108. Based on the simplified model adopted by ICRP to arrive at the results reported in Publication 108, the average value of dose coefficients of each organ of the insect is used to calculate the results presented in this paper. The dose coefficients of internal and external ^{90}Sr irradiation for the simplified anatomical model of *Sphingonotus* were found to be $6.59 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $6.74 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. Meanwhile, the dose coefficients of internal and external ^{137}Cs irradiation for the simplified anatomical model were $1.34 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $4.40 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. The dose coefficients were $7.87 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $6.74 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. The dose coefficients were $1.33 \times 10^{-4} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $3.51 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. The dose coefficients of internal and external ^{90}Sr radiation for reference insects as reported in the ICRP Publication 108 were $1.00 \times 10^{-2} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $3.90 \times 10^{-10} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. Moreover, the dose coefficients of internal and external ^{137}Cs radiation in the ICRP Publication 108 were $3.20 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ and $2.80 \times 10^{-3} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$, respectively. The above data indicate that the dose coefficients of internal irradiation reported in the ICRP Publication 108 are larger than those calculated using the proposed dosiological model, whereas those of external irradiation in ICRP Publication 108 are smaller. This trend is probably related to the size of the organism, decay rate, and energy of radionuclides. The adoption of a simplified anatomical model, morphologically similar to the organism, and a voxel model, highly overlapping with the organism, in this study allows a visualization of the real exposure situation for the organism considered with high accuracy, proving the feasibility of the insect dosimetry model established in this study.

KEYWORDS *Sphingonotus* insects, Simplified anatomical models, Voxel model, Dose coefficients

CLC TL7, TL72

在我国就环境辐射影响这一问题,设立了相关法律法规。在《环境影响评价技术导则核电厂环境影响报告书的格式和内容》(HJ 808—2016)中,规定应结合厂址环境条件,确定具有参考价值的指示物种;给出一种方法能够评价及估算非人类物种辐射剂量及影响;对于同一厂址后续建造的机组,还应给出厂址所有机组对厂址周围代表性生物的辐射剂量等^[1]。此外,从生物对放射性核素累积效应和生态平衡的角度看,也必须保护除了人类以外的物种—非人类物种,保护它们的种群、生物栖息地不受不可接受的影响,所以对于非人类物种的剂量评价是非常有必要的。

生物剂量学模型自20世纪70年代后期发展起来,在辐射防护体系中动植物需要可靠的、广泛适用的模型来估算内、外照射导致的剂量^[2]。因此在剂量学模型的发展史上,最先出现的是整体简化模型^[3]。近年来,随着研究人员对生物剂量学模型的深入研究,发现了一种能够考虑生物体组织/器官的简化解剖学模型,其能够考虑放射性核素在生物体内及放射性核素在不同组织/器官的分布,减少了不确定因素^[4-6]。随着层析成像技术和计算机技术的迅速发展,为更好地研究非人类物种辐射生物效应与剂

量之间的关系创造条件。越来越多的研究人员致力于使用计算机开发人体^[7-9]乃至动物体的仿真模型,并结合计算机建立实际情况下放射性核素在生物体体内的分布情况。尤其是最近几年,根据生物体的解剖及切片数据建立的体素模型迅速发展,使得非人类生物辐射防护研究水平飞跃提升^[10-12]。本文基于简化解剖学模型和体素模型计算了 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 对蒙古束颈蝗不同组织和器官的内、外照射剂量系数,并与ICRP 108号出版物^[13]中提供昆虫剂量系数进行比较,验证本次建立昆虫剂量学模型可行性。

1 材料与方法

1.1 生物剂量系数计算方法

内照射剂量系数的计算方法,将具有浓集某种放射性核素的器官/组织设定为源器官/组织,将受到辐射的器官/组织设定为靶器官/组织,则生物体内照射剂量系数计算见公式(1)。

$$DC_{ij}(E_i) = \frac{5.76 \times 10^{-4} \sum E_i Y_i F_{ij}(E) M_i}{M_j} \quad (1)$$

式中: $DC_{ij}(E_i)$ 是源器官/组织*i*中能量为 E_i 的射线粒子对应于靶器官/组织*j*的剂量系数, $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$;

Y_i 是放射性核素每衰变一次能量为 E_i 的辐射产额; $F_{i,j}(E_i)$ 为放射性核素衰变一次能量为 E_i 的辐射被生物体吸收的能量吸收分数; M_i 是源器官/组织的质量,kg; M_j 是靶器官/组织的质量,kg^[4,12,14]。

外照射剂量系数的计算方法为将生物体所在的所有环境介质当做辐射源,估算公式与(1)相似,其中 $DC_{i,j}(E_i)$ 是质量为 M_i 的外部环境介质中能量为 E_i 的射线粒子对应于靶器官/组织 j 的外照射剂量系数, $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$; M_i 是外部环境介质 i 的质量,kg^[4,12,14]。

1.2 简化解剖学模型建立

本研究基于解剖学和几何学建立蒙古束颈蝗

简化解剖学模型,根据解剖结果分割出外骨骼、消化器官、生殖器官和其他组织,按照解剖数据将蒙古束颈蝗组织/器官使用椭圆壳、圆柱壳、圆柱、椭球和圆锥壳简化,为获得物理参数将其组织/器官分割后送第三方检测公司进行全元素分析^[12]。图1为蒙古束颈蝗实物图和部分解剖图。

蒙古束颈蝗简化解剖学模型的几何中心在(0, 0, 0)处,蒙古束颈蝗简化解剖学模型几何参数见表1,在 X 轴上的分布范围为 $-1.64\text{ cm} < X < 2.72\text{ cm}$,在 Y 轴上的分布范围 $-0.49\text{ cm} < Y < 0.49\text{ cm}$,在 Z 轴上的分布范围 $-0.49\text{ cm} < Z < 0.49\text{ cm}$,蒙古束颈蝗简化解剖学模型如图2、3所示。

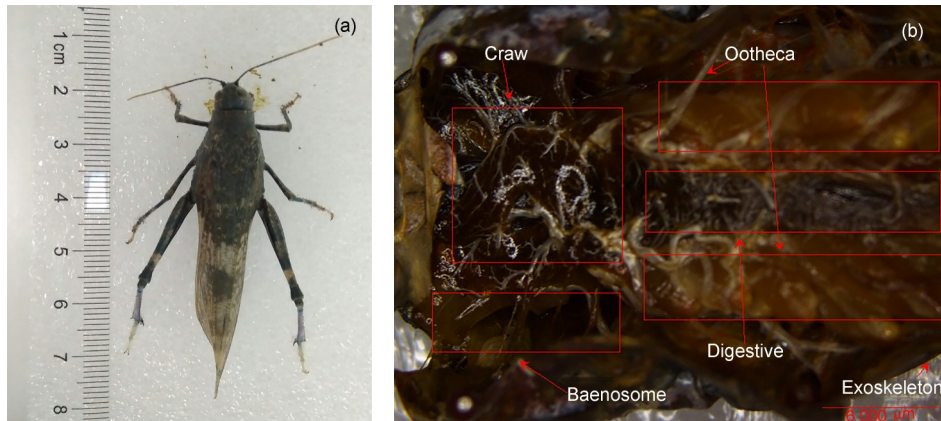


图1 蒙古束颈蝗实体图(a)和解剖图(b)
Fig.1 Diagram (a) and anatomical map (b) of the *Splingonotus*

表1 蒙古束颈蝗简化解剖学模型几何参数
Table 1 Geometrical parameter of the simplified anatomy model of the *Splingonotus*

组织/器官	几何形状	曲面方程(长、宽、高= X 、 Y 、 Z)
Tissue/organ	Geometrical shape	Equation of surface (Long, wide and high= X , Y , Z)
头	椭圆壳	$\frac{(x + 1.494)^2}{0.15^2} + \frac{y^2}{0.249^2} + \frac{z^2}{0.484^2} \leq 1; \frac{(x + 1.494)^2}{0.05^2} + \frac{y^2}{0.149^2} + \frac{z^2}{0.284^2} \geq 1$
Head	Elliptical shell	
胸	圆柱壳	$y^2 + z^2 - 0.4895^2 \leq 0; y^2 + z^2 - 0.4675^2 \geq 0; -1.344 < x < 0$
Baenosome	Cylindrical shell	
腹	圆锥壳	$\sqrt{y^2 + z^2} + 0.1546(x - 3.1666) \leq 0; \sqrt{y^2 + z^2} + 0.1546(x - 3.0243) \geq 0; 0 < x < 2.717$
Abdomen	Conical shell	
胃	圆柱体	$y^2 + z^2 - 0.1^2 \leq 0$
Craw	Cylinder	
消化道	圆柱体	$y^2 + z^2 - 0.186^2 \leq 0; 0.2 < x < 2.7$
Digestive tract	Cylinder	
卵巢	椭球体	$\frac{(x - 1.016)^2}{1.006^2} + \frac{(y - 0.254)^2}{0.1^2} + \frac{z^2}{0.2^2} - 1 \leq 0; \frac{(x + 1.016)^2}{1.006^2} + \frac{(y + 0.254)^2}{0.1^2} + \frac{z^2}{0.2^2} - 1 \leq 0$
Ootheca	Spheroid	

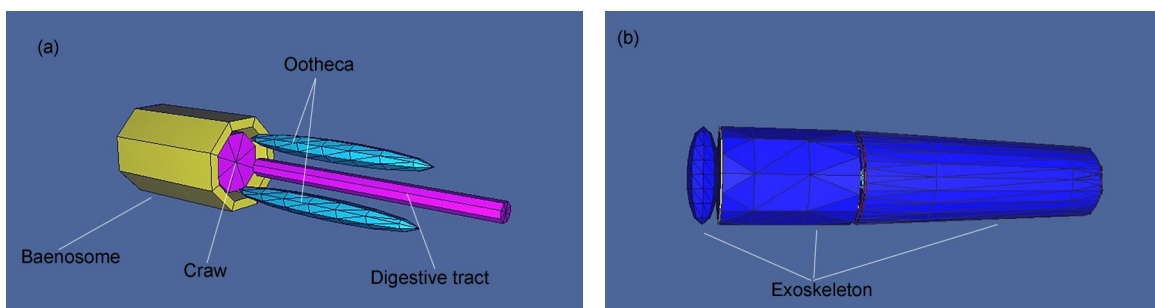


图2 蒙古束颈蝗简化解剖学模型内外立体图：(a)蒙古束颈蝗内部立体图；(b)蒙古束颈蝗外部立体图

Fig.2 Graphic model of the simplified anatomy model of the *Splingonotus*:
(a) internal structure diagram; (b) external structure drawing

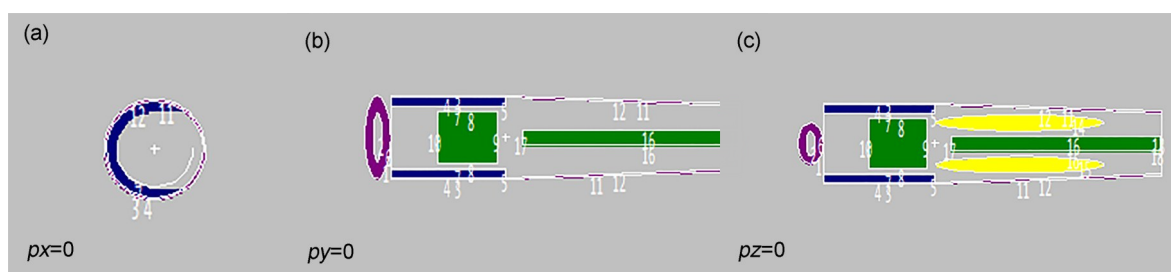


图3 蒙古束颈蝗简化解剖学模型 $px=0$ (a)、 $py=0$ (b)、 $pz=0$ (c) 截面图

Fig.3 Sectional drawing of the $px=0$ (a), $py=0$ (b), and $pz=0$ (c) of the *Splingonotus*

1.3 体素模型建立

本研究中昆虫断层序列图像由山西省煤炭中心医院放射科提供，采用美国 GE 公司制造的 LightSpeed16 排螺旋 CT 按横断位对蒙古束颈蝗进行断层扫描。将 CT 机的 X 射线管的管电压设定为 120.0 kV，管电流设定为 210.0 mA，共获得 117 张蒙古束颈蝗断层序列图像，获得图像扫描间隔均为 0.625 mm，图片像素个数为 512×512，图片尺寸为 18.06 cm×18.06 cm，分辨率为 28.346 像素/厘米，体素大小为 0.352 7 mm×0.352 7 mm×0.625 0 mm。使用 PS 软件将像素调整为 100 像素/厘米，像素个数变为 1 806×1 806，体素大小减小到 0.1 mm×0.1 mm×0.625 mm。山西省煤炭中心医院放射科提供的蒙古束颈蝗断层序列图像经过三维重建后重新获取图像，所以医院提供的昆虫断层序列图像无需再进行图像配准。^[12]

使用蒙特卡罗计算蒙古束颈蝗体素模型时，必须赋予组织/器官相应的元素组成和密度，由于获得的 CT 断层序列图像是灰度图，所以要将图片的数字信息转换成符合蒙特卡罗输入文件的物理信息，

根据昆虫的实物解剖图对 CT 断层序列图像进行器官/组织的分割并将同一器官填充同一种颜色^[12]，见图 4。

使用 Python 编写程序，将上述处理后的图像根据每种颜色的色彩模式值 (RGB) 将图像转换为蒙特卡罗重复结构卡输入矩阵：(1) 定义图片长宽分别为 $Xlenth$ 、 $Ylenth$ ，定义当前像素种类为 $currentClass$ ，数量为 $currentNum$ ；(2) 依次编列图片中每个像素，并获取像素 RGB 值，使 $currentClass$ 等于当前像素 RGB 种类；(3) 判断下一个像素是否为该种类像素，如果是该种类像素，则 $currentNum+1$ ，否则将结果保存到 res 中，并将 $currentClass$ 等于新的像素 RGB 种类；(4) 将 res 连续输出，则为蒙特卡罗重复结构卡的数据矩阵^[12]。

表 2 为蒙古束颈蝗体素模型参数，各器官/组织的体素个数由 Python 编程统计，密度由第三方检测公司采用 GB/T 19587—2017 检测标准，使用比表面及孔径分析仪和排水法测得。将得到的重复结构矩阵加入蒙特卡罗的重复卡中，使用蒙特卡罗结合 Xming 软件，得到蒙古束颈蝗体素模型 XY 、 XZ 、 YZ 的截面图，如图 5 所示。

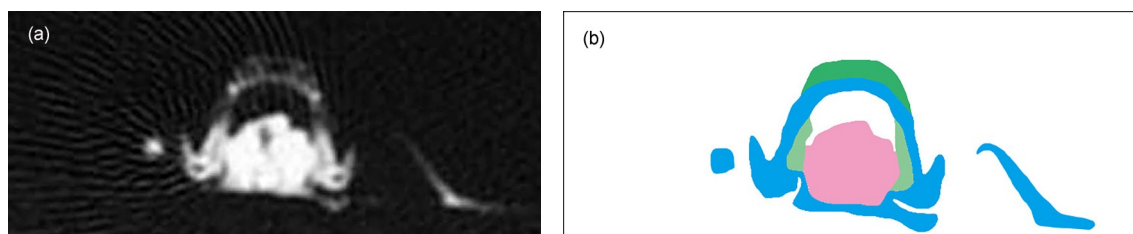


图4 蒙古束颈蝗部分CT断层序列图像:(a)PS调整后的蒙古束颈蝗部分CT断层序列图像;
(b)识别与分割后蒙古束颈蝗部分CT断层序列图像

Fig.4 CT fault sequence image of the *Splingtonotus*: (a) CT fault sequence image of the *Splingtonotus* in PS adjusted;
(b) CT fault sequence image of the identified and segmented part of the *Splingtonotus*

表2 蒙古束颈蝗体素模型CT断层序列参数
Table 2 CT fault sequence image parameters of the voxel model of the *Splingtonotus*

组织/器官 Tissue/organ	体素个数 The number of voxel	体积 / cm ³ Volume	密度 / g·cm ⁻³ Density	质量 / g Mass
外骨骼 Exoskeleton	300 548	1.88	1.36	2.55
消化器官 Digestive organs	27 352	1.71×10 ⁻¹	8.84×10 ⁻¹	1.51×10 ⁻¹
生殖器官 Reproductive organ	17 358	1.09×10 ⁻¹	9.87×10 ⁻¹	1.07×10 ⁻¹
其他组织 Other organizations	16 639	1.04×10 ⁻¹	9.34×10 ⁻¹	9.71×10 ⁻²
外部空气 Air	27 392 076	1.71×10 ²	1.29×10 ⁻³	2.21×10 ⁻¹
总计 Total	27 753 973	1.74×10 ²	-	2.90

注: -, 无数据。

Note: -, Has no data.

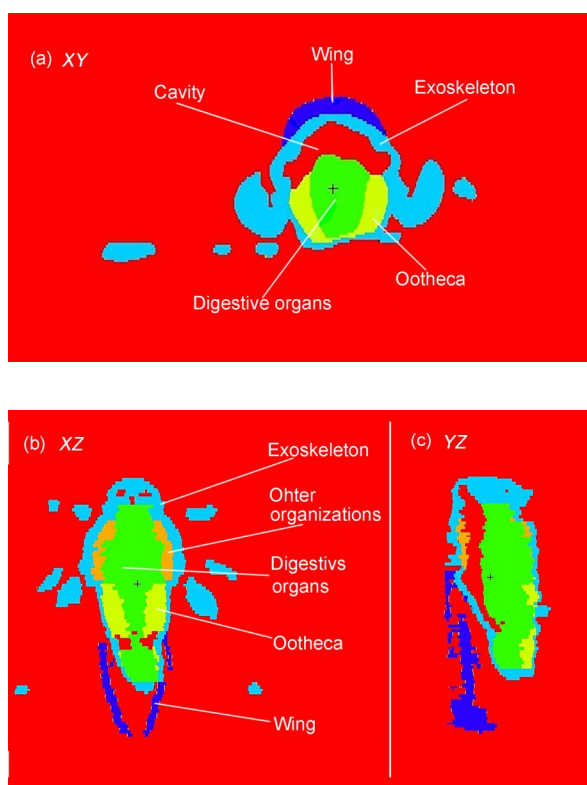


图5 蒙古束颈蝗体素模型XY、XZ、YZ截面图

Fig.5 Sectional view of the voxel model of the *Splingtonotus*

2 蒙古束颈蝗剂量系数估算结果

2.1 蒙古束颈蝗筒化解剖学模型估算结果

2.1.1 蒙古束颈蝗筒化解剖学模型内照射剂量系数估算结果

使用蒙特卡罗模拟粒子输运功能计算放射性核素在蒙古束颈蝗体内沉积能^[12],再根据公式(1)计算出蒙古束颈蝗内照射剂量系数,表3为⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗内照射剂量系数的计算结果。

2.1.2 蒙古束颈蝗筒化解剖学模型外照射剂量系数估算结果

将蒙古束颈蝗所在环境介质视为辐射源,土壤源厚度为10 cm(ERICA推荐土壤源厚度)^[12],以蒙古束颈蝗所在位置为圆心,每隔1 cm增加一个圆弧的方式不断扩大辐射源面积,如图6所示,直至计算结果达到平衡状态。使用蒙特卡罗粒子输运功能计算出放射性核素在蒙古束颈蝗体内沉积能,结合式(1)及外照射剂量系数计算方法,得到蒙古束颈蝗筒化解剖学模型外照射剂量系数,图7为⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗外照射剂量系数的计算结果。

表3 蒙古束颈蝗简化解剖学模型内照射剂量系数
Table 3 Internal exposure dose coefficients of the simplified anatomy model of the *Splingonotus* ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$)

放射性核素 Radionuclide	靶器官 Target organ	源器官 Source organ			
		生殖器官 Reproductive organ	其他组织 Other organizations	外骨骼 Exoskeleton	消化器官 Digestive organs
^{90}Sr	外骨骼 Exoskeleton	1.76×10^{-4}	1.92×10^{-6}	6.85×10^{-7}	1.05×10^{-6}
	消化器官 Digestive organs	1.05×10^{-3}	2.55×10^{-4}	8.52×10^{-5}	8.15×10^{-7}
	生殖器官 Reproductive organ	1.22×10^{-4}	2.67×10^{-5}	3.62×10^{-4}	1.41×10^{-5}
	其他组织 Other organizations	2.50×10^{-4}	3.42×10^{-7}	1.87×10^{-5}	2.69×10^{-4}
	合计 Total	1.60×10^{-3}	2.84×10^{-4}	4.67×10^{-4}	2.85×10^{-4}
	平均值 Mean value	6.59×10^{-4}			
^{137}Cs	外骨骼 Exoskeleton	7.39×10^{-5}	2.96×10^{-7}	2.71×10^{-8}	2.51×10^{-8}
	消化器官 Digestive organs	1.57×10^{-4}	9.37×10^{-5}	1.71×10^{-6}	1.57×10^{-7}
	生殖器官 Reproductive organ	4.90×10^{-6}	5.36×10^{-7}	1.01×10^{-4}	2.47×10^{-7}
	其他组织 Other organizations	6.00×10^{-6}	6.64×10^{-8}	3.28×10^{-7}	9.66×10^{-5}
	合计 Total	2.42×10^{-4}	9.46×10^{-5}	1.03×10^{-4}	9.70×10^{-5}
	平均值 Mean value	1.34×10^{-4}			

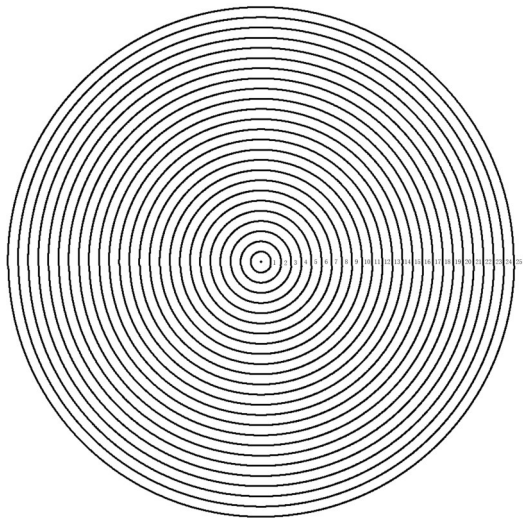


图6 外照射辐射源计算方法示意图
Fig.6 Schematic diagram of external radiation source calculation

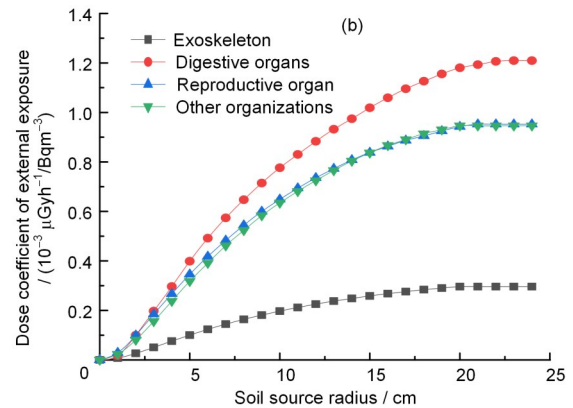
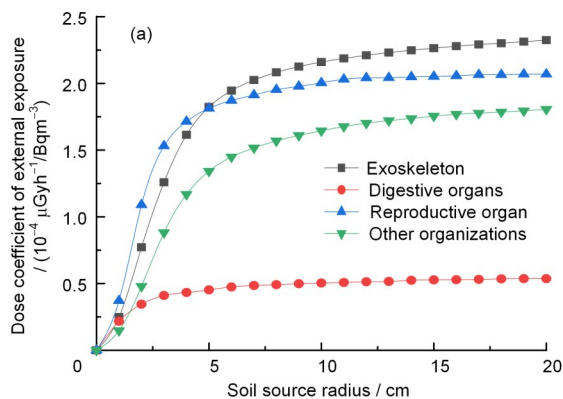


图7 ^{90}Sr (a)和 ^{137}Cs (b)蒙古束颈蝗简化解剖学模型外照射剂量系数计算结果

Fig.7 External exposure dose coefficients of ^{90}Sr (a) and ^{137}Cs (b) of the simplified anatomy model of the *Splingonotus* ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$)



2.2 蒙古束颈蝗体素模型估算结果

2.2.1 蒙古束颈蝗体素模型内照射剂量系数估算结果

同筒化解剖学模型,通过蒙特卡罗模拟计算放射性核素在蒙古束颈蝗体内组织器官中的沉积能,再根据式(1)计算出蒙古束颈蝗内照射剂量系数,表4为 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 对蒙古束颈蝗体素模型内照射剂量系数的计算结果。

2.2.2 蒙古束颈蝗体素模型外照射剂量系数估算结果

同筒化解剖学模型的源设置方式,采用蒙特卡罗粒子输运过程计算出蒙古束颈蝗体素模型各组

织/器官沉积能^[12],再根据式(1)和外照射计量系数计算方法得到蒙古束颈蝗体素模型外照射剂量系

数。图8为⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗体素模型外照射剂量系数的计算结果。

表4 蒙古束颈蝗体素模型内照射剂量系数
Table 4 Internal exposure dose coefficients of the voxel model of the *Splingonotus* ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$)

放射性核素 Radionuclide	靶器官 Target organ	源器官 Source organ			
		外骨骼 Exoskeleton	消化器官 Digestive organs	生殖器官 Reproductive organ	其他组织 Other organizations
⁹⁰ Sr	外骨骼 Exoskeleton	4.47×10^{-4}	3.47×10^{-6}	4.56×10^{-6}	6.69×10^{-6}
	消化器官 Digestive organs	2.41×10^{-4}	4.93×10^{-4}	6.01×10^{-5}	5.39×10^{-5}
	生殖器官 Reproductive organ	3.43×10^{-4}	6.59×10^{-5}	4.23×10^{-4}	2.63×10^{-6}
	其他组织 Other organizations	5.88×10^{-4}	6.88×10^{-5}	3.01×10^{-6}	3.42×10^{-4}
	合计 Total	1.62×10^{-3}	6.31×10^{-4}	4.91×10^{-4}	4.05×10^{-4}
	平均值 Mean value	7.87×10^{-4}			
¹³⁷ Cs	外骨骼 Exoskeleton	1.07×10^{-4}	3.57×10^{-7}	3.46×10^{-7}	5.78×10^{-7}
	消化器官 Digestive organs	2.50×10^{-5}	1.08×10^{-4}	4.00×10^{-6}	3.76×10^{-6}
	生殖器官 Reproductive organ	2.67×10^{-5}	4.45×10^{-6}	1.04×10^{-4}	4.52×10^{-7}
	其他组织 Other organizations	5.13×10^{-5}	4.83×10^{-6}	5.56×10^{-7}	9.17×10^{-5}
	合计 Total	2.10×10^{-4}	1.18×10^{-4}	1.09×10^{-4}	9.65×10^{-5}
	平均值 Mean value	1.33×10^{-4}			

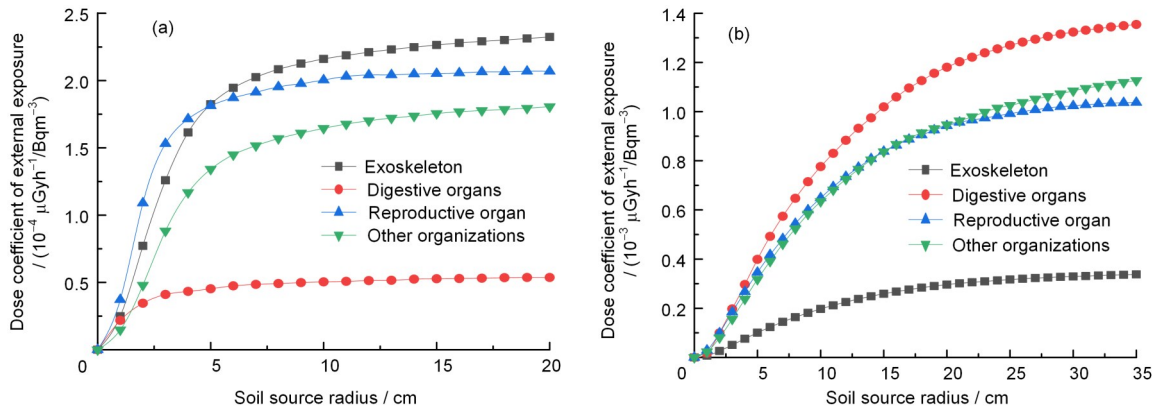


图8 ⁹⁰Sr(a)和¹³⁷Cs(b)蒙古束颈蝗体素模型外照射剂量系数计算结果
Fig.8 External exposure dose coefficients of ⁹⁰Sr (a) and ¹³⁷Cs (b) of the voxel model of the *Splingonotus* ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$)

根据图7和图8,⁹⁰Sr为纯β衰变,平均能量为195.7 keV。随着源半径不断增加,外骨骼呈现屏蔽趋势,蒙古束颈蝗筒化解剖学模型组织/器官剂量系数从大到小顺序为:外骨骼、其他组织、生殖器官、消化器官;蒙古束颈蝗体素模型组织/器官剂量系数从大到小顺序为:外骨骼、生殖器官、其他组织、消化器官。¹³⁷Cs在衰变为稳定核素¹³⁷Ba时存在一个γ能量的能级跃迁,能量为661.6 keV,因此¹³⁷Cs的粒子能量能够穿过外骨骼屏蔽层,对内部器官产生照射剂量,蒙古束颈蝗筒化解剖学模型和体素模型组织/器官剂量系数从大到小顺序为:消化器官、生殖

器官、其他组织、外骨骼。在本次模拟的数据中明显得到,⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对蒙古束颈蝗的生殖器官剂量率均较大,是否对生殖及繁衍子体有影响需具体的生物效应实验验证。

2.3 讨论

在ICRP 108号出版物中查询⁹⁰Sr、¹³⁷Cs对参考昆虫剂量系数^[13],与本次建立的蒙古束颈蝗筒化解剖学模型和体素模型计算结果进行比较分析,由于ICRP 108号出版物计算的是整体生物的剂量系数,所以本次比较使用本文计算结果总体平均值。详见表5。

表5 蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型与ICRP 108号出版物结果比较
Table 5 Calculation result of the simplified anatomy model and voxel model of the *Splingonotus* is compared with the result of the ICRP 108 publications ($\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$)

计算方法 Computing method	^{90}Sr		^{137}Cs	
	内照射 Internal exposure	外照射 External exposure	内照射 Internal exposure	外照射 External exposure
简化解剖学模型 Simplified anatomical models	6.59×10^{-4}	6.74×10^{-4}	1.34×10^{-4}	4.40×10^{-3}
体素模型 Voxel model	7.87×10^{-4}	6.74×10^{-4}	1.33×10^{-4}	3.51×10^{-3}
ICRP 108号出版物 ICRP Publication 108	1.00×10^{-2}	3.90×10^{-10}	3.20×10^{-3}	2.80×10^{-3}

注：蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型外照射剂量系数单位为 $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$ ，为方便比较，将单位转换为 $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ 。这里使用土壤密度由上述检测机构检测， $\rho_{\text{soil}}=1.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

Note: the external radiation dose coefficient unit of the simplified anatomical models and voxel model of *Splingonotus* is $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$, for the convenience of comparison, the unit is converted to $\mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$. The soil density used here is detected by the above-mentioned testing agency, $\rho_{\text{soil}}=1.6 \text{ kg}/\text{m}^3$.

本研究建立的蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型计算出的内外照射剂量系数与ICRP 108比较显示，在内照射中， ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 对蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型均在同一数量级，并且均比ICRP 108号出版物小；在外照射中， ^{90}Sr 对蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型外照射剂量系数相同，但均大于ICRP 108号出版物，但在ERICA软件的计算结果中， ^{90}Sr 对昆虫的剂量系数为 $1.62 \times 10^{-5} \mu\text{Gyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ ，比本次建立蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型外照射剂量系数小， ^{137}Cs 对蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型与ICRP 108号出版物均在同一数量级。说明本次建立的蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型方法可行。出现这样的结果分析其原因：(1)使用模型不同，本次建立简化解剖学模型和体素模型能体现生物体内部组织/器官，ICRP 108号出版物所用ICRP推荐整体简化模型不能体现生物体内部组织结构；(2)昆虫的大小可能小于粒子平均自由程，导致粒子能量没有完全沉积在生物体体内；(3)放射性核素辐射类型存在主观因素，本研究中 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 考虑了两种放射性核素几乎所有辐射类型。以上分析出现1种或多种都会对计算结果产生影响。

3 总结

将生物体数字化，建立的数字模型与蒙特卡罗中粒子输运过程相结合，建立生物剂量学模型，实现可视化、精确化，为后续建立适合我国生态环境非人类物种辐射影响评价方法奠定基础。本次建立蒙古束颈蝗简化解剖学模型和体素模型为国内首

例，且在昆虫辐射剂量研究领域中，首次对昆虫类生物建立精细化剂量学模型，为昆虫类辐射剂量评价领域增加新的估算方法。根据本次的研究成果，可依据中国不同地理、气候特征，划分不同区域，在不同区域内分别筛选一套适合我国剂量学评价的代表性生物，针对中国不同气候区域内代表性生物建立剂量学模型，使用蒙特卡罗粒子输运过程模拟计算放射性核素对代表性生物的剂量系数，结合人工智能及大数据相关算法或模型，自动构建模拟程序，建立我国代表性生物剂量相关数据数据库。

作者贡献声明 贡文静负责完成程序编写、数据分析、文章初稿写作及参考文献分析；张超参与现场采样和原始数据获取与分析；张晟负责程序编写和数据整理；王慧娟指导程序编写与结果分析；曹俏收集解剖数据及数据分析；原寒收集CT扫描数据及断层序列图像处理；李建国指导本研究设计及结果分析；韩宝华指导数据分析、论文写作与修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则核电厂环境影响报告书的格式和内容: HJ 808—2016 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technica guidelines for environmental impact assessment format and content of environmental impact repotrs for nuclear power plants: HJ 808—2016[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.

- 2 Ulanovsky A, Pröhl G, Gómez-Ros J M. Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, **99**(9): 1440-1448. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.01.010.
- 3 Clarke R H, Holm L E. Development of ICRP's philosophy on the environment. A report of environmental protection: the concept and use of reference animals and plants[J]. *Annals of the ICRP*, 2008, **38**(4/5/6): 3-242. DOI: 10.1016/j.icrp.2009.04.002.
- 4 韩学垒, 李建国. 非人类物种辐射剂量估算中剂量转换因子分析[J]. *辐射防护通讯*, 2011, **31**(1): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2011.01.003.
HAN Xuelei, LI Jianguo. Analysis of dose conversion coefficient for radiation dose evaluation in non-human species[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2011, **31**(1): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2011.01.003.
- 5 李静晶, 刘森林, 王春红. 鲮鱼解剖学模型剂量计算及与整体模型比较[J]. *原子能科学技术*, 2011, **45**(2): 150-155.
LI Jingjing, LIU Senlin, WANG Chunhong. Calculation on radiation doses to mullet in anatomic model and comparison to unitary model[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2011, **45**(2): 150-155.
- 6 姚青山, 武奕华. 戈壁滩环境中非人类生物辐射剂量评估技术研究进展[J]. *中国原子能科学研究院年报*, 2020: 108-109.
YAO Qingshan, WU Yihua. Progress in non-human biological radiation dose assessment techniques in Gobi Desert[J]. *Annual Report For China Institute of Atomic Energy*, 2020: 108-109.
- 7 Li J L, Qiu R, Zhang Z, *et al.* Organ dose conversion coefficients for external photon irradiation using the Chinese voxel phantom (CVP) [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2009, **135**(1): 33-42. DOI: 10.1093/rpd/ncp087.
- 8 路伟, 武祯, 邱睿, 等. 基于中国参考人体素模型环境外照射剂量转换系数的计算[J]. *计算物理*, 2016, **33**(5): 613-624. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.2016.05.014.
LU Wei, WU Zhen, QIU Rui, *et al.* Dose coefficient calculation of external exposure of radionuclides based on Chinese reference voxel phantom[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2016, **33**(5): 613-624. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.2016.05.014.
- 9 崔甜甜, 张书源, 王一迪, 等. GATE在计算人体素模型光子剂量转换系数的应用分析[J]. *核技术*, 2018, **41**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040501.
CUI Tiantian, ZHANG Shuyuan, WANG Yidi, *et al.* Application of GATE in calculating photon dose conversion coefficient of human voxel phantom[J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040501.
- 10 Zhang X M, Xie X D, Qu D C, *et al.* Determining organ dose conversion coefficients for external neutron irradiation by using a voxel mouse model[J]. *Journal of Radiation Research*, 2016, **57**(2): 182-188. DOI: 10.1093/jrr/rrv078.
- 11 Mitrovic M, Ciraj-Bjelac O, Jovanovic Z, *et al.* Voxel model of a rabbit: assessment of absorbed doses in organs after CT examination performed by two different protocols[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2021, **60**(4): 631-638. DOI: 10.1007/s00411-021-00941-7.
- 12 贡文静, 张晟, 张超, 等. 西北地区陆生典型昆虫剂量学模型的建立及应用[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2021, **41**(11): 856-861. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.11.011.
GONG Wenjing, ZHANG Sheng, ZHANG Chao, *et al.* Establishment and application of typical insect dose model in northwestern China[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2021, **41**(11): 856-861. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.11.011.
- 13 Clarke R H, Holm L E. Development of ICRP's philosophy on the environment. A report of environmental protection: the concept and use of reference animals and plants[J]. *Annals of the ICRP*, 2008, **38**(4/5/6): 3-242. DOI: 10.1016/j.icrp.2009.04.002.
- 14 贡文静, 王慧娟. 非人类物种辐射影响评价中不同剂量率估算模型比较[J]. *辐射防护*, 2021, **41**(6): 558-564.
GONG Wenjing, WANG Huijuan. The study of DCs in the assessment of non-human species[J]. *Radiation Protection*, 2021, **41**(6): 558-564.