

动态核事故农业后果评估模型开发及应用研究

崔慧玲, 黄莎, 吕明华, 赵多新, 张俊芳, 李云鹏

引用本文:

崔慧玲, 黄莎, 吕明华, 等. 动态核事故农业后果评估模型开发及应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 723-735.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1314>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北太平洋公海中心渔场海域放射性核素 ^{137}Cs 的生态环境监测与风险评估

唐峰华, 张胜茂, 吴祖立, 崔雪森

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 680-687 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1643>

基于WebGIS的农产品产地污染评价系统设计与实现

朱权, 宋金茜, 姜小三, 王强

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1850-1857 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0227>

镉砷在线蠕中的毒物-毒效动力学过程及定量模拟

李敏, 龚冰, 黄雪莹, 肖雪, 何尔凯, 仇荣亮

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1451-1459 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0209>

基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算

凡翔, 吴凤平, 孟岑, 叶磊, 李希, 张满意, 李裕元, 吴根义, 吴金水

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 185-193 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0762>

土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究

何赢, 杜平, 石静, 秦晓鹏, 徐刚, 吴明红

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1734-1740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1423>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

崔慧玲, 黄莎, 吕明华, 等. 动态核事故农业后果评估模型开发及应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 723-735.

CUI Hui-ling, HUANG Sha, LÜ Ming-hua, et al. Development and application of a dynamic model for assessment of agriculture consequences of nuclear accident[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 723-735.



开放科学 OSID

动态核事故农业后果评估模型开发及应用研究

崔慧玲, 黄莎, 吕明华, 赵多新, 张俊芳, 李云鹏

(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: 为了评估核事故对农业生态环境的影响, 建立了动态核事故农业后果评估模型 AgrRAM (Agriculture radioactivity assessment Model)。AgrRAM 基于动态模型理论, 从沉积计算开始模拟了放射性核素在农业环境中的动态迁移过程, 真实地反映了核事故后农业辐射效应。用 AgrRAM 模型以田湾核电厂为中心进行 200 km×200 km 范围的假想事故模拟计算, 计算了不同事故时间典型农产品比活度空间分布及时间序列, 说明 AgrRAM 具有动态模拟核事故农业后果的功能。计算结果表明: 事故发生时间与农产品的生长特征密切相关, ^{134}Cs 在不同事故时间农产品中的最终活度变化为 1~2 个数量级, ^{131}I 不同事故时间对最终活度的影响达 1~5 个数量级; 相同条件下, 农作物中 ^{131}I 的活度水平衰减较快, 如果收割时间距事故时间间隔较长, 则 ^{131}I 的辐射危害较小。模型参数灵敏度测试显示转移因子对活度水平影响显著, 尤其是只有根吸收的作物。模型的可靠性验证分析显示, AgrRAM 与保守的平衡模型结果偏差在 5 倍左右, 说明了 AgrRAM 结果的可靠性。

关键词: 核事故; 动态评估模型; 农业后果; 比活度

中图分类号: X82; S181 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)04-0723-13 doi:10.11654/jaes.2020-1314

Development and application of a dynamic model for assessment of agriculture consequences of nuclear accident

CUI Hui-ling, HUANG Sha, LÜ Ming-hua, ZHAO Duo-xin, ZHANG Jun-fang, LI Yun-peng

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

Abstract: In order to evaluate the impact of nuclear accidents on agricultural ecological environment, a dynamic agricultural radiation assessment model (AgrRAM) was developed. Based on the dynamic model theory, AgrRAM simulates the dynamic transfer process of radionuclides in an agricultural environment from the deposition stage, which reflects real agricultural radiation effects after a nuclear accident. Taking Tianwan nuclear power plant as the epicenter, the simulation of hypothetical accidents in the range of 200 km×200 km was carried out by AgrRAM. The spatial distribution and time series of the specific activities of typical agricultural products were calculated to show the function of AgrRAM as dynamically simulating the agricultural consequences of nuclear accidents. The time of the accident was closely related to the growth characteristics of the agricultural products. The different accident time made the specific activity change by 1~2 orders of magnitude for ^{134}Cs and 1~5 orders of magnitude for ^{131}I . Under the same conditions, the activity of ^{131}I in crops decayed faster than other nuclides, and if the interval between harvest time and accident time was long enough, the radiation damage of ^{131}I was small. The sensitivity tests of the model parameters showed that the transfer factor had a great influence on the activity, especially for crops with only root uptake. The reliability analysis of AgrRAM showed that the deviation between AgrRAM and the conservative equilibrium model was approximately 5 times, which indicates the reliability of AgrRAM.

Keywords: nuclear accident; dynamic assessment model; agricultural consequence; specific activity

收稿日期: 2020-11-13 录用日期: 2020-12-30

作者简介: 崔慧玲 (1967—), 女, 山西太原人, 博士, 副研究员, 研究方向为核事故后果评价。E-mail: Cui0910@126.com

为了阻止和减小核设施对农业环境的潜在核事故后果影响,建立旨在保护食物和农产品的核事故应急反应系统非常必要。应急反应系统包含大气扩散模型、农业后果评估模型和对应的农业措施。1986年切尔诺贝利核事故由于缺乏应急反应系统,导致事故后食物里不合理的 ^{131}I 活度水平和之后高的甲状腺剂量及甲状腺癌记录^[1]。2011年日本福岛核事故使邻近土壤遭受了严重威胁,但是由于吸取了切尔诺贝利事故的经验,通过应急反应系统及时采取了农业应对措施,有效降低了人的吸收剂量^[2]。国际上关于影响食物和农业的核应急系统开发始于2013年,在FAO/IAEA组织框架下进行^[3](FAO: Food and Agriculture Organization, IAEA: International Atomic Energy Agency),该计划同时开展的还有国际间关于农产品的采样分析及数据采集工作。农业的核事故应急反应,既要采取及时、恰当的农业措施,同时又不能造成大量的污染废物,这就需要农业评估模型提供可靠的评估结果。我国现有的核事故应急反应系统只有简单的食物链模型,单独针对农业环境的核事故后果评估模型开发研究较少。20世纪80年代食物链模型随着核事故后果评估系统的开发而开发,计算了核素从生态环境进入粮食作物,再通过食入途径形成食入剂量的过程,计算分为动态模型和平衡模型。平衡模型一般假设生态系统处于平衡静止的状态,核素迁移过程不存在时空差异。事实上放射性核素在生态环境中的迁移是一个动态过程,生态环境变化和生物体自身新陈代谢都会影响其最终的活度^[4-6]。动态模型计算结构复杂,需要很多难以获得的动态生态参数和较高的计算性能,难以在应急情况下应用。因而计算简洁快速的平衡模型成为核事故评估系统的主要计算方法。例如英国和德国联合开发的COSYMA^[7]和美国的MACCS^[8]中的食物链模型都是平衡模型,只有欧洲JRODOS^[9]系统中的食物链模型采用了动态模型。现在比较成熟、完全的动态食物链模型是ECOSYS模型^[10],它是一个针对德国中部农业环境开发的动态食物链模型。由于模型应用的复杂性,ECOSYS在其他国家的应用研究较少,主要研究工作集中在北欧地区。Liland等^[11]用包含ECOSYS的ARGOS和其他模式组成模式链,用于挪威塞拉菲尔德后处理厂的核事故应急评估,计算了事故条件下的食入剂量。Slavik等^[12]对ECOSYS在斯洛伐克共和国的本地化及应用做了研究,在分析收集数据的基础上,建立了新物种“苜蓿”的参数,计算了切尔诺贝利事故后各食物的活

度并与检测数据进行对比,结果显示模型结果与观测数据有较好的一致性。

随着放射性核素生态环境迁移研究的深入和计算机性能的大幅提高,能更真实反映事故后核素迁移过程的动态模型逐渐成为事故后果评估的主要方法。本文基于动态模型理论和食物链模型ECOSYS的计算方法,建立了基于我国农业生态环境的动态核事故农业后果评估模型AgrRAM,为核事故应急反应系统提供基础数据。AgrRAM是应急反应系统的一个模块,它以大气扩散模型的结果为输入,模型从沉积计算开始完整模拟了核事故后放射性尘埃在农业生态环境中的沉积、迁移及最终形成农产品活度的过程,考虑了生态环境变化及生物体自身的生长过程,计算了随时间变化的典型农产品活度的时间、空间分布。用AgrRAM模型对处于我国重要夏粮产地(黄淮海区域)的田湾核电厂进行了假想事故后果计算并对结果进行了讨论,说明新建模型AgrRAM具有动态模拟计算的功能,真实反映了核事故后农产品的活度分布,定量计算了核事故后农业辐射效应。由于缺乏核事故后农作物的实际监测数据,AgrRAM模型通过与保守的平衡模型对比进行了模型可靠性验证。

1 AgrRAM的模型结构及主要计算过程

AgrRAM模型计算主要分两个部分:农业生态环境沉积计算和核素迁移计算。模型的结构及计算流程如图1所示,计算始于大气扩散模型的结果也可用环境监测数据作为输入。模型的输入数据有网格化的时间积分空气活度浓度和降雨量等,输出有地面沉积活度分布和农产品比活度空间分布及时间序列。

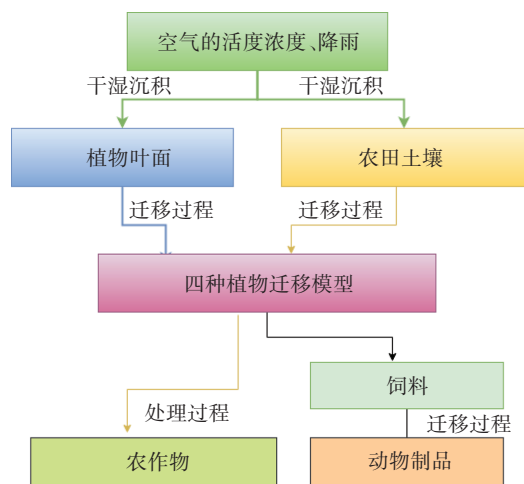


图1 AgrRAM模型计算流程图

Figure 1 AgrRAM calculation flow chart

1.1 沉积计算

放射性尘埃在农业生态环境中的沉积分两部分,一部分是植物叶面的直接沉积,另一部分是土壤的沉积。植物叶面干沉积计算考虑了大气阻力和植物冠层阻力,在湿沉积计算中考虑了植物的截留作用。植物沉积计算主要过程如下:

$$A_i = A_{di} + f_{wi} \times A_w \quad (1)$$

$$A_{di} = V_i \times \bar{C}_{air} \quad (2)$$

$$A_w = A \times \bar{C}_{air} \quad (3)$$

式中: A_i 是对于*i*植物的总沉积量, $Bq \cdot m^{-2}$; A_{di} 是对于*i*植物的干沉积, $Bq \cdot m^{-2}$; A_w 是对于*i*植物的湿沉积量, $Bq \cdot m^{-2}$; f_{wi} 是湿沉积截留因子; $\bar{C}_{air}$ 是空气积分浓度, $Bq \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$; V_i 是对于植物*i*的沉积速度, $mm \cdot s^{-1}$; A 是冲洗系数。沉积速度等参数的计算如下:

$$V_i = \frac{1}{R_a + R_c} \quad (4)$$

$$R_a = \frac{1}{U \left(\frac{0.4}{\log(Z_u/Z_0)} \right)^2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{R_c} = V_{plant,max} \cdot \frac{LAI_i}{LAI_{i,max}} \quad (6)$$

式中: R_a 、 R_c 分别是大气和植物冠层阻力系数; U 是风速, $m \cdot s^{-1}$; Z_u 、 Z_0 分别是测风高度和地表粗糙度, m ; $V_{plant,max}$ 是植物最大沉积速度(模型内部参数), $m \cdot s^{-1}$; LAI_i 、 $LAI_{i,max}$ 分别是计算时刻叶面指数和最大叶面指数。

对于土壤沉积的计算如下:

$$A_s = A_{ds} + A_w \quad (7)$$

$$A_{ds} = A_{soil,max} \times \bar{C}_{air} \quad (8)$$

$$A_w = A \times \bar{C}_{air} \quad (9)$$

式中: A_s 是土壤表面的总沉积量, $Bq \cdot m^{-2}$; A_{ds} 是土壤表面干沉积, $Bq \cdot m^{-2}$; $A_{soil,max}$ 是核素在农田中的最大干沉积速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

1.2 农作物活度主要计算方法

核事故后农作物的活度来自叶吸收和根吸收。在叶吸收计算中,植物活度除了来自初始沉积,还需要考虑生长稀释、天气过程、核素衰减、核素易位等过程,这些过程都需通过参数化计算。根据过程不同叶吸收分为牧草、绿叶菜类、果实根茎类蔬菜和水果类、谷物类4个基本计算模型。计算结果为各农产品的比活度(鲜质量),主要计算公式如下:

$$C_i(t) = C_{il}(t) + C_{ir}(t) \quad (10)$$

$$C_{il}(\Delta t) = \frac{A_i}{Y_i} \exp[-(\lambda_w + \lambda_r) \times \Delta t] \quad (11)$$

$$C_{ir} = TF_i \times C_s(\Delta t) \quad (12)$$

$$C_s(t) = \frac{A_s}{L\delta} [a_s \times \exp(-b_1 \times t) + (1 - a_s) \times \exp(-b_2 \times t)] \times \exp(-\lambda_r \times t) \quad (13)$$

式中: C_{il} 是来自叶吸收的活度, $Bq \cdot kg^{-1}(FW)$; C_{ir} 是来自根吸收的活度, $Bq \cdot kg^{-1}(FW)$; Y_i 是植物*i*的单位产量, $kg \cdot m^{-2}(FW)$; λ_w 、 λ_r 分别为天气衰减因子和核素衰减率; TF_i 是土壤到植物*i*的转移因子; C_s 是根部土壤的活度浓度, $Bq \cdot kg^{-1}$; A_s 是土壤的总沉积, $Bq \cdot m^{-2}$; L 是土壤深度, m ; δ 是土壤密度, $g \cdot m^{-3}$ 。

1.3 动物产品活度主要计算方法

农作物如牧草、玉米等作为饲料通过食入进入家禽、家畜体内,最终形成肉、蛋、奶中的活度。主要计算公式如下:

$$A_{animal,i} = \sum_{k=1}^m C_k(t) \times I_{k,i}(t) \quad (14)$$

$$C_i(T) = TF_i \times \sum_{j=1}^j \{ a_{i,j} \times \int_0^T A_{a,i}(t) \times \lambda_{b,i,j} \times \exp[-(\lambda_{b,i,j} + \lambda_r)(T-t)] dt \} \quad (15)$$

式中: $A_{animal,i}$ 是动物*i*食入的活度, Bq ; C_k 是饲料*k*的活度, $Bq \cdot kg^{-1}(FW)$; $I_{k,i}$ 是饲料*k*的食入量, $kg \cdot d^{-1}(FW)$; C_i 是动物产品*i*的活度, $Bq \cdot kg^{-1}(FW)$; TF_i 是核素的转移因子; $\lambda_{b,i,j}$ 是核素*j*在农产品*i*中的生物衰减率; $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 是核素在农产品中的生物半衰期对应参数。

1.4 建立模型内部参数

由上述沉积和迁移计算公式可见,计算涉及大量生态参数,而生态参数有明显的地域差异。AgrRAM模型建立后,对处于主要夏粮产地的田湾核电站周边200 km进行了生态参数调研和文献研究^[13-15],建立了一套基于该农业生态环境的生态参数体系。农业生态参数分为:农业区域特定参数和一般参数(与核素性质相关)。区域特定参数反映该地区农业生产的一般特征,具体如表1所示。

一般参数有:

(1)天气衰减因子(由于天气原因如风、雨、雾等

表1 区域特定参数

Table 1 Specific ecological parameters in a region

名称 Items	需要收集的生态参数 Ecological parameters collected		
农作物清单	生长、收割期	随时间变化的叶面指数	单位产量
饲料清单	饲料处理因子	储存时间	各饲料的份额
粮食清单	粮食处理因子	储存时间	各粮食产品份额
核素相关参数	植物上的沉积速度	湿沉积拦截因子	转移因子/易位因子

导致的放射性活度的衰减),根据当地气候及降雨情况进行设置。

(2)核素在土壤中的浸出率、固定率、吸收率、再悬浮率。

(3)核素从土壤到植物的转移因子(与土壤类型相关)。

(4)核素从饲料到肉蛋奶的转移因子。

(5)核素在各农作物中的易位因子。

(6)核素的生物半衰期。

除了天气因子,其他参数均选择了IAEA技术报告^[16]中的参数及JRODOS中的参数^[17]。

2 田湾核电厂事故后果案例计算

2.1 核电厂址周边农业生态条件

田湾核电厂位于江苏省最北部,处于山东、江苏交界。该区域属于黄淮海地区,本区光热水分与地形条件耦合较佳,是我国传统农业区。以田湾核电厂为中心(34.68°N, 119.46°E),用 AgrRAM 模型进行 200

km×200 km 范围假想核事故农业后果计算。该区域所属行政区有:山东省临沂市、日照市和江苏省连云港市,依据文献和统计年鉴收集特定生态参数。根据收集的环境气象数据及地理数据,对计算区域进行二级划分^[18],分为两个农业区如图2所示,农业及气象特征如表2所示。

计算区域主要作物有:冬小麦、水稻、玉米、大豆、花生、甘薯、水果、蔬菜等,冬小麦和夏播玉米是该区的主要耕作方式。各农作物的播种收获时间如表3所示,典型农作物的叶面指数如表4所示,单位产量来自文献和各地统计年鉴^[19-21]。该区主要饲养家畜有牛、羊、猪和鸡,养殖业特点是精饲料充足,但是粗饲料特别是青饲料不足。奶牛的青饲占比为50%,产肉家畜的青饲占比为17%。建立的饲料配方见表5。

2.2 模型计算条件

不同事故发生时间对农业生产影响不同,因此选择2017年4月10日、6月1日和10月20日分别进行事故后果计算。收集田湾核电厂气象铁塔及周边气

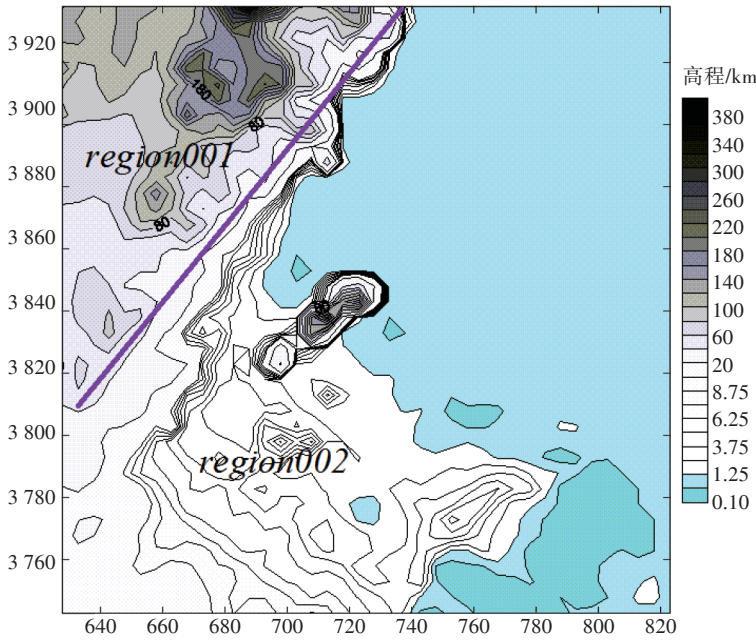


图2 以田湾核电为中心 200 km×200 km 地形(UTM 坐标)
Figure 2 The terrain of 200 km×200 km with Tianwan NPP as center

表2 两个农业区的环境和农业特征

Table 2 Environmental parameters and agriculture features in two sub-region

分区 Sub-region	行政区 Administrative region	典型作物 Typical plant	地形高度 Terrain height/m	平均温度 Ave. temperature/℃	平均降水 Ave. precipitation/mm
001	日照、临沂	小麦、玉米	60~350	12.6	860~910
002	连云港	小麦、玉米	2~60	14.1	920~940

表3 两个放射生态区的农作物生长期
Table 3 The growth and harvest period in two sub-region

子区1(临沂、日照)Region001(Linyi,Rizhao)			子区2(连云港)Region002(Lianyungang)		
农作物	播种时间(月-日)	收割期(月-日)	农作物	播种时间(月-日)	收割期(月-日)
青草	01-01	01-01—12-31	青草	01-01	01-01—12-31
冬小麦	09-25	06-10—06-20	冬小麦	10-05	06-01—06-10
玉米	04-15	08-10—08-20	玉米	04-01	07-20—07-31
水稻	06-10	10-20—10-31	水稻	06-20	10-10—10-20
红薯	05-10	10-01—10-15	红薯	04-25	09-20—10-05
豆类	04-05	07-20—07-31	豆类	04-05	07-20—07-31
花生	04-25	10-01—10-01	花生	04-10	09-20—10-05
叶菜	02-05	10-20—10-31	叶菜	01-20	11-01—11-20
瓜类菜	02-05	06-01—07-15	瓜果类菜	01-20	05-20—06-30
水果	03-15	07-10—07-31	水果	03-10	07-01—07-20

表4 主要农作物不同生长期的叶面指数[月-日(叶面指数)]
Table 4 The LAI of different plants in grown period

农作物 Plants	LAI ₁	LAI ₂	LAI ₃	LAI ₄	LAI ₅
青草	01-01(0.01)	03-06(0.5)	05-05(1)	09-30(1)	12-30(0.05)
冬小麦	01-01(1)	04-20(2)	05-10(6)	06-20(0)	
玉米	04-01(0)	05-10(1)	06-25(4.5)	07-01(4)	08-21(0)
水稻	06-10(0)	08-20(2)	09-10(5.5)	10-01(5)	11-01(0)
红薯	04-25(0)	06-01(1)	08-20(3.5)	09-20(1.5)	10-16(0)
豆类	04-05(0)	05-10(1)	06-20(4)	08-01(0)	
叶菜	01-20(0)	03-20(3.5)	10-01(3.5)	11-20(0)	
水果	03-10(0)	06-25(5)	07-01(5)	08-01(0)	

表5 两个区域的饲料清单(kg·d⁻¹,FW)
Table 5 Feed list of both region 001 and region 002(kg·d⁻¹,FW)

饲料Feed-stuffs	奶牛Cow	羊Lamb	猪Pork	鸡Chicken
青草(或草粉)	7.2	2.00		
玉米	4.1	0.19	3.0	0.17
麦麸(冬小麦)	1.8	0.03	1.0	0.02
豆粕	2.5	0.11	1.0	0.04
花生饼	0.5	0.05	0.5	0.03
总量	16.1	2.38	4.0	0.25

象站点的观测数据,用扩散模型进行事故后的扩散计算,以扩散模型的空气积分浓度作为AgrRAM模型的输入,进行农业事故后果计算。具体计算条件如表6所示。

2.3 结果讨论

2.3.1 农产品的活度分布

不同事故发生时间对于农业生态环境的影响不同,如果事故发生在作物生长期,活度来自叶面直接

表6 AgrRAM 田湾核电案例计算条件
Table 6 AgrRAM simulation conditions of Tianwan NPP

模拟条件 Simulation conditions	参数设置 Parameters
事故释放源强(Bq·s ⁻¹)	3.6×10 ¹⁷
事故时间/h	14:00—22:00
释放核素	¹³¹ I、 ¹³⁷ Cs、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁴ Cs
大气扩散模型	RAMS/RIMPUFF
农业后果评估模型	AgrRAM
计算区域	200 km×200 km
输出结果	比活度空间分布及关心点的比活度时间序列

沉积的叶吸收和土壤的根吸收,如果事故发生在播种之前或收割之后,则没有直接沉积叶吸收,只有根吸收。为了展示活度随时间的变化,选择¹³⁴Cs(ncs4)和半衰期较短的¹³¹I(nii1)进行不同事故时间活度对比(¹³⁴Cs半衰期为2 a,¹³¹I半衰期为8 d)。图3~图5是3个事故发生时间农产品在计算区域的比活度分布。事故发生在4月10日时的农产品最大比活度分布如图3所示,青草和绿叶菜已经处于生长期,在青草和绿叶菜上发生了直接沉积。绿叶菜作为全部食用产品,叶吸收和根吸收导致绿叶菜较高的活度,而青草作为饲料通过迁移进入奶牛和牛奶形成了牛奶中的活度,由于迁移过程对活度的消减作用,最终牛奶的活度小于绿叶菜的活度。同时绿叶菜收割后很快被全部食用,核素衰减时间短,而牛奶需考虑从青草到奶牛及牛奶的迁移时间,核素衰减也导致牛奶活度比绿叶菜低。对于冬小麦,由于播种时间为9月底10月初,因此没有发生叶面直接沉积,活度来自土壤沉积后的根吸收,所以活度较低,¹³¹I对冬小麦未形成辐射

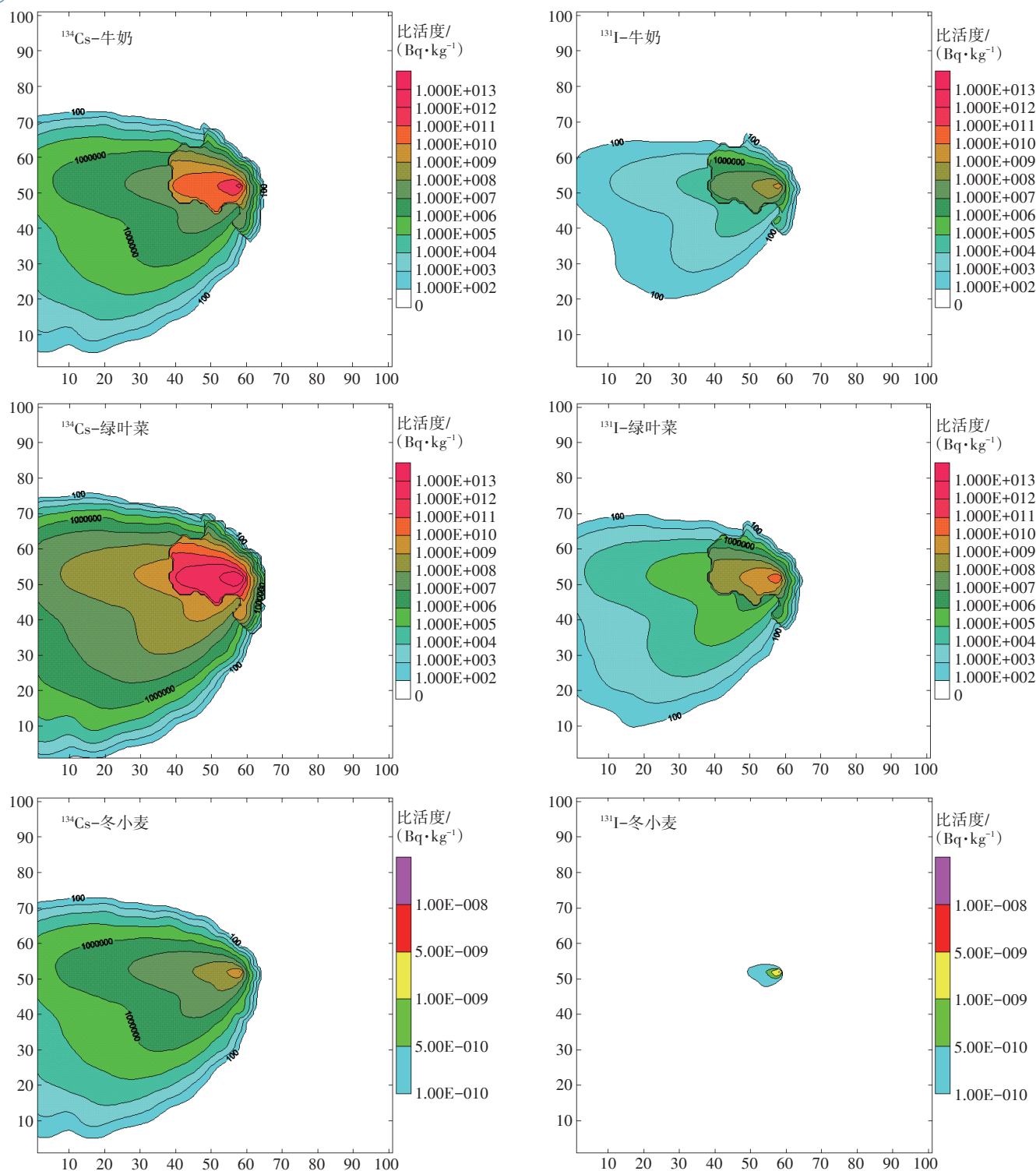


图3 事故发生在4月10日时农产品(鲜质量)最大比活度分布(UTM坐标)

Figure 3 Maximum specific activity(FW) distributions of agricultural product of nuclear accident of April 10

危害($\leq 10^{-9} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$)。在各个农产品中, ^{134}Cs 活度均高于 ^{131}I ,这主要是由于核素半衰期的差异,从事故发生到收获农产品, ^{131}I 衰减较快,导致其活度降低。

图4是事故发生在6月1日时各农产品的比活度

分布。青草和绿叶菜在6月进入成熟期,叶面指数达到最大值,当此时发生事故,放射性尘埃在作物上的直接沉积将会最大。如图所示,对于牛奶和绿叶菜事故后活度均处于较高分布,但是两种作物从4月到6

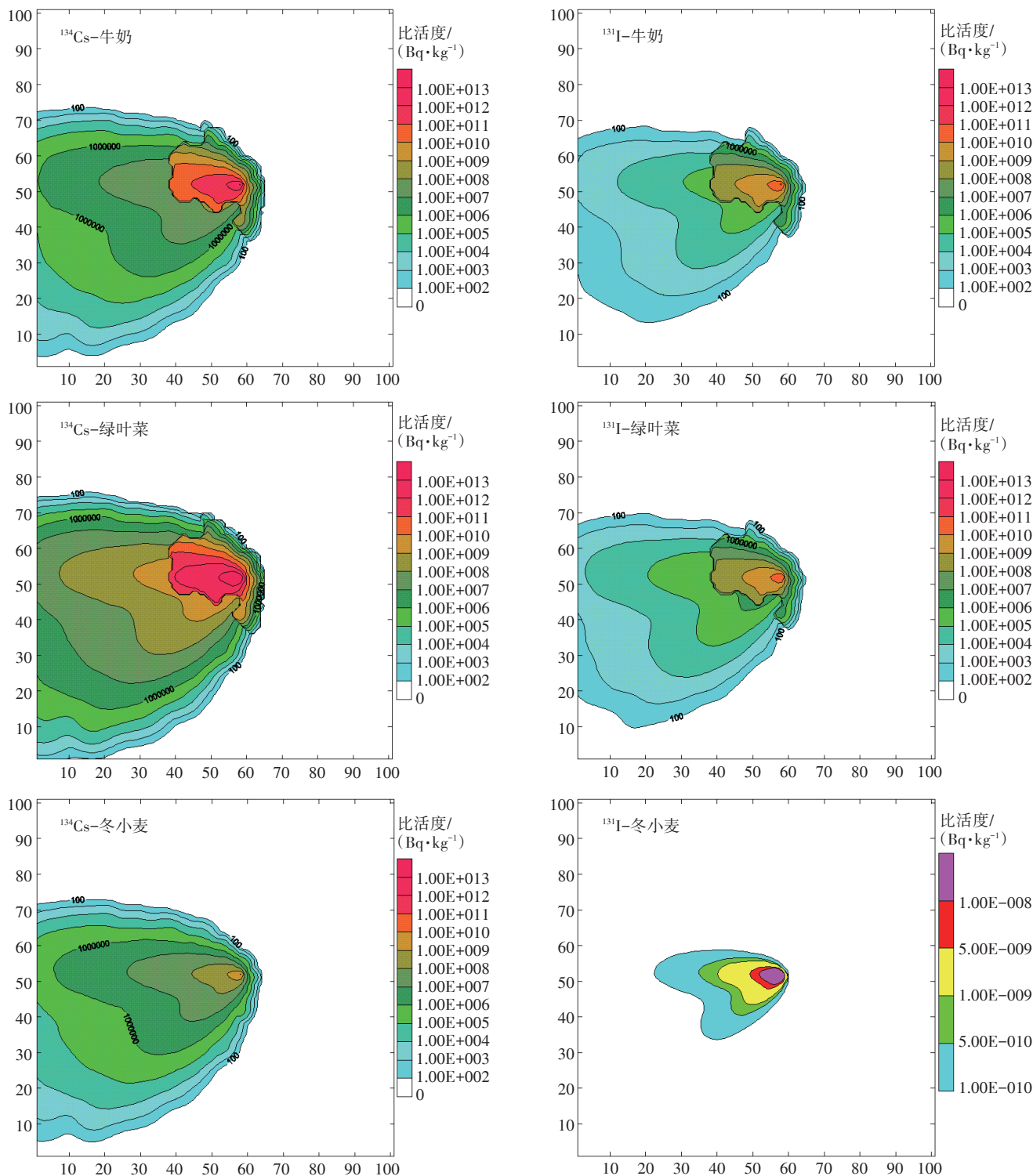


图4 事故发生在6月1日时农产品(鲜质量)最大比活度分布(UTM坐标)

Figure 4 Maximum specific activity(FW) distributions of agricultural product of nuclear accident of June 1

月叶面指数增长幅度较小,相同距离处活度略有增大。与图3相比,差别较大的是 ^{131}I 在冬小麦中的活度分布。这是由于事故时间6月距离冬小麦播种时间比4月更接近,所以对于短半衰期的 ^{131}I ,冬小麦活

度虽比4月增大,但也未形成辐射危害($\leq 10^{-8} \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)。

事故发生在10月20日时各农产品最大比活度分布如图5所示,此时变化最大的仍然是 ^{131}I 在冬小麦

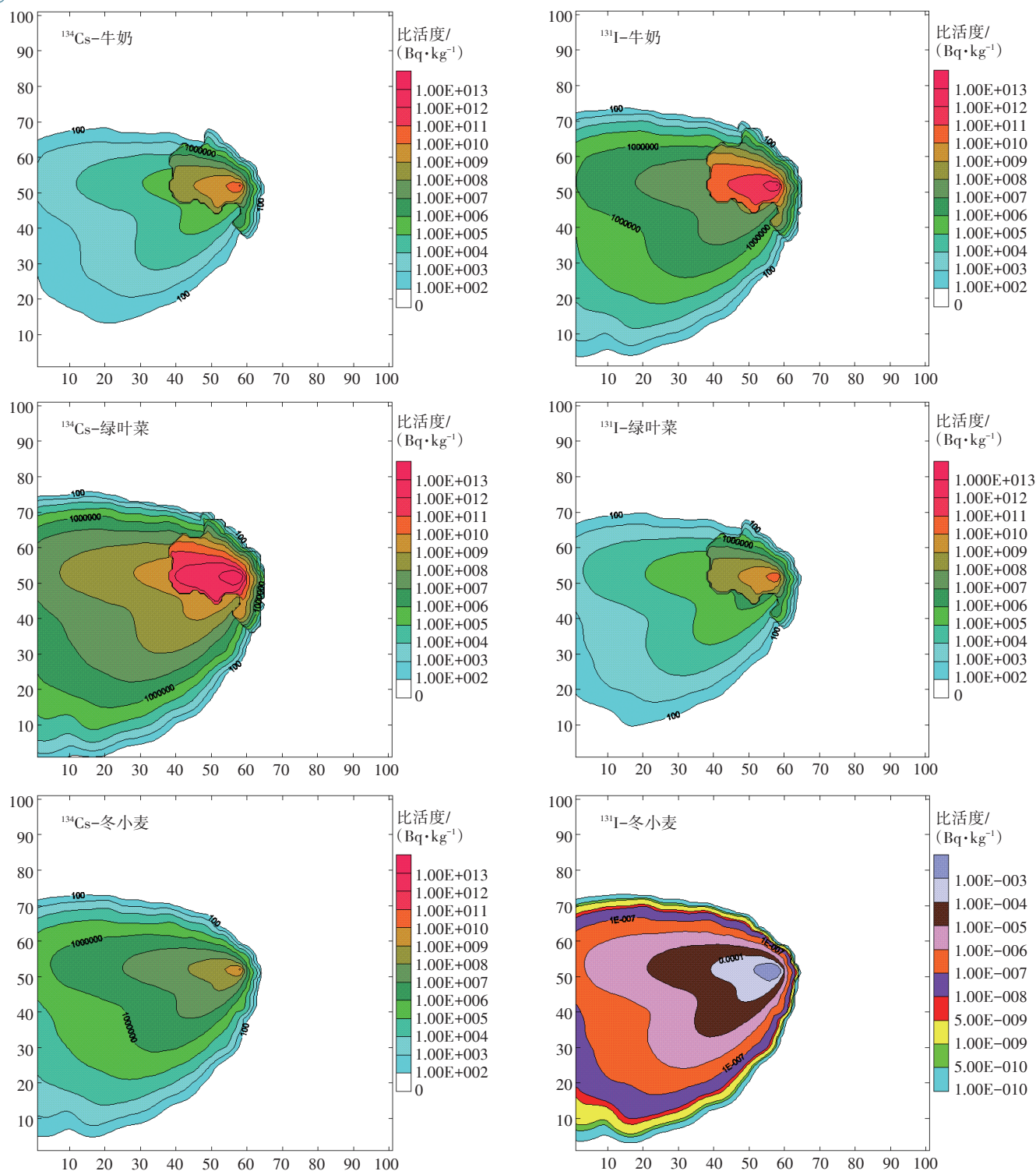


图5 事故发生在10月20日时农产品(鲜质量)最大比活度分布(UTM坐标)

Figure 5 Maximum specific activity(FW) distributions of agricultural product of nuclear accident of October 20

中的比活度分布。由于10月初冬小麦已经播种,发生了在幼苗上的直接沉积,最大比活度增至 $1\times 10^{-3}\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ FW,但仍未形成辐射危害。绿叶菜和青草在10月仍然处于生长期,活度略有降低但变化不

明显。对于其他作物例如水稻、玉米等已经收割的作物,事故发生在10月与4、6月相比变化较大,这些作物的活度来自下一个生长季的根吸收,对于短半衰期的 ^{131}I ,当下一季作物收割时, ^{131}I 活度水平降至很低。

从上述计算结果可见,对于动态模型,由于农业生态环境和农产品自身变化,不同事故时间的事故后果有很大差异,同一事故不同农产品的污染水平也不相同。AgrRAM模型展示了动态的计算过程,更真实地反映了实际事故后果。对于农作物影响最严重的事故是发生在植物生长期,放射性尘埃直接沉积在叶面进入作物,如果事故发生在临近收割之前,事故后果最严重。为了对农产品进行定量活度对比,采用日本福岛事故数据进行计算:事故为 ^{137}Cs 的沉积,沉积量为 $100\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ (日本福岛核事故30 km范围内 ^{137}Cs 典型的沉积水平),计算3个上述事故时间各农产品的最高活度,结果如图6所示。当事故发生在4月时,只有牛奶、羊肉、牛肉、鸡肉的比活度超出了一般食品的限值($1\ 000\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$)^[22],这些动物产品的活度来自饲料如青草等。当事故发生在6月时,只有大葱、鸡肉、鸡蛋的比活度未超限值,其他产品都超过了限值。当事故发生在10月时,青草、绿叶菜、牛奶、大葱、牛肉、羊肉的比活度超过限值。牛、羊肉中高的活度是由于饲料中的青草及储存干草的高活度。10月一些作物的低活度是由于沉积发生在收割之后,活度来自下一个季节土壤向植物的转移。

2.3.2 典型农作物的活度时间序列

不同核素半衰期不同,图7是事故发生在6月1日时 ^{131}I 和 ^{134}Cs 在不同农产品中的比活度时间序列对比。比活度结果输出从各农产品的收割日开始,横坐标为时间步长(图中所示是从收割日到第60个时间步的计算结果)。由于半衰期不同, ^{131}I 衰减速度很快,而 ^{134}Cs 活度变化比较平缓。在青草中,由于生长期和收割期较长,所以核素直接沉积在青草上并形成较高的活度。但是随着时间的推移, ^{131}I 沉积发生后

的175 d活度已降至 $700\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$,而 ^{134}Cs 活度仍然高达 $9.58\times 10^{10}\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。对于该地区的中稻,由于沉积发生在播种之前,活度主要来自土壤向根的迁移,从沉积到水稻收割的190 d, ^{131}I 活度大幅衰减,收割时只有 $60\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$,而 ^{134}Cs 活度达 $6\times 10^9\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$, ^{134}Cs 在第40 a活度才会降至几百 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。青草中高的活度浓度导致牛奶中的高活度(假设牛饲料中的青草均来自本地区),在沉积发生后第235 d,牛奶中 ^{131}I 活度就降至 $100\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$,满足了GB/T 18871—2002标准,但 ^{134}Cs 活度一直在 $1\times 10^{12}\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 数量级,同样大约40 a后活度才会降至几百 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。绿叶菜与青草类似,有较长的生长期及收割期,虽然初始活度较高,但是在沉积发生后的210 d时 ^{131}I 的活度就降至几百 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$,但是 ^{134}Cs 活度一直较高,40~50 a后活度将降至几百 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。

3 AgrRAM模型的验证分析

AgrRAM模型计算流程简洁清晰,计算结果的精确性基于真实可靠的农业生态参数及输入的大气扩散模型的结果。AgrRAM验证分析由两部分组成:第一部分是对于模型本身参数灵敏度的测试分析;第二部分是与平衡模型计算结果对比,验证模型的可靠性。

3.1 模型参数灵敏度测试

3.1.1 叶面指数

放射性尘埃沉积在植物或土壤上,沉积量的大小决定了农业环境的活度水平,而核素的沉积速度和气象条件影响了沉积量的大小。AgrRAM中假设事故形成的是放射性气溶胶,农作物上的沉积速度计算见公式(4)。由公式可见沉积速度与作物的最大沉积速

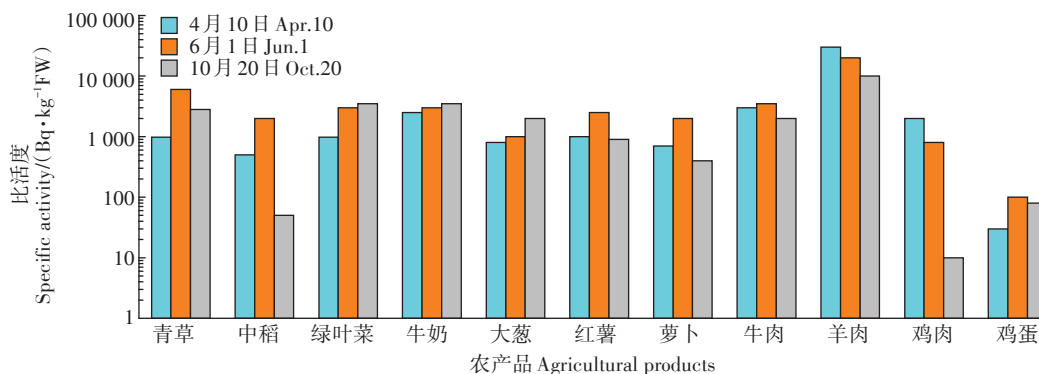


图6 不同事故时间农产品最大比活度对比

Figure 6 The comparison of maximum specific activity of products at different accident time

度和叶面指数相关,作物的最大沉积速度由模型内部参数给出,所以选择不同的叶面指数进行模型参数灵敏度测试。

3.1.2 转移因子

放射性核素在农业环境中的迁移包括土壤到作物的迁移(转移因子)和核素在作物内部的易位(易位

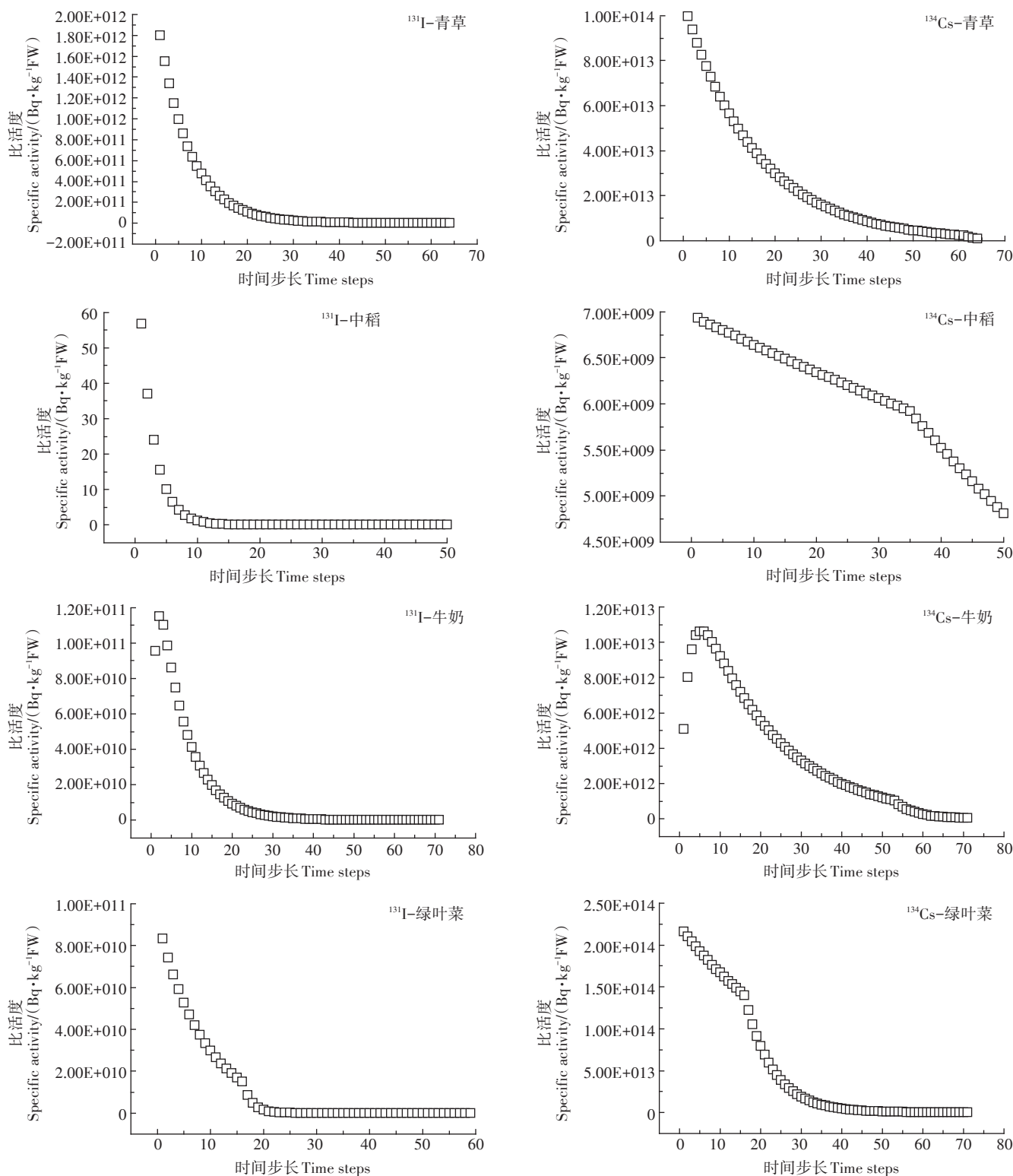


图7 农作物比活度(FW)随时间的变化

Figure 7 The time series of specific activity(FW) of agricultural products

因子),其中转移因子的作用更重要。IAEA EMRAS 项目(2003—2011)生物工作组对11种来源的转移因子进行了分析研究,并出版了IAEA TRS NO.472^[23]等系列报告,研究指出不同来源的转移因子导致最终活度在1~2个数量级范围的变化。

选择代表性农作物和核素两组不同的转移因子进行参数灵敏度测试,改变叶面指数和转移因子,其他参数不变进行计算,计算条件如表6。图8所示是事故发生在4月10日时的活度对比。

由图8a和图8b可见,当叶面指数增大10%时,绿叶菜的活度变化比较明显,其他作物差别不明显,这是因为农作物的叶面指数变化范围很小,进入成熟期各作物的叶面指数差别不大,所以叶面指数对活度变化的影响较小。¹³¹I和¹³⁷Cs在绿叶菜中的活度变化大于⁹⁰Sr。由图8c和图8d可见,放射性核素从土壤向农作物的转移因子与作物最后的活度水平直接相关。由于计算的事故时间为大部分作物播种之前,此时核素由土壤到植物的转移因子与最终的活度水平是线性关系,当转移因子增大为模型设定数值的10倍,计

算结果也为原来的10倍。绿叶菜的活度计算与其他作物的计算方式不同,而且活度除了根吸收还有叶面直接沉积。

3.2 验证分析

核事故后农作物的实际测量数据难以获得,而且事故发生地的生态参数、地理和气候数据也难以收集,因此无法用实测数据进行AgrRAM模型的验证。为了检验AgrRAM结果的合理性,采用与传统的平衡模型对比进行模型可靠性验证。平衡模型计算方法是由环境到作物直接迁移,不考虑生态环境的变化,长期被用来作为食物链模型的计算方法,为后果评估系统提供数据支持。为了评估AgrRAM模型的可靠性,用两个模型进行平行计算,计算单位沉积量的最大比活度,结果见表7~表9。

由AgrRAM与平衡模型的结果对比可见,两个模型对于农作物的比活度偏差在3倍左右,对于动物产品的比活度偏差在5倍左右,说明了AgrRAM模型结果的可靠性。正如很多研究指出,在所有环境迁移模型中,生态环境的迁移模型不确定性最大,这

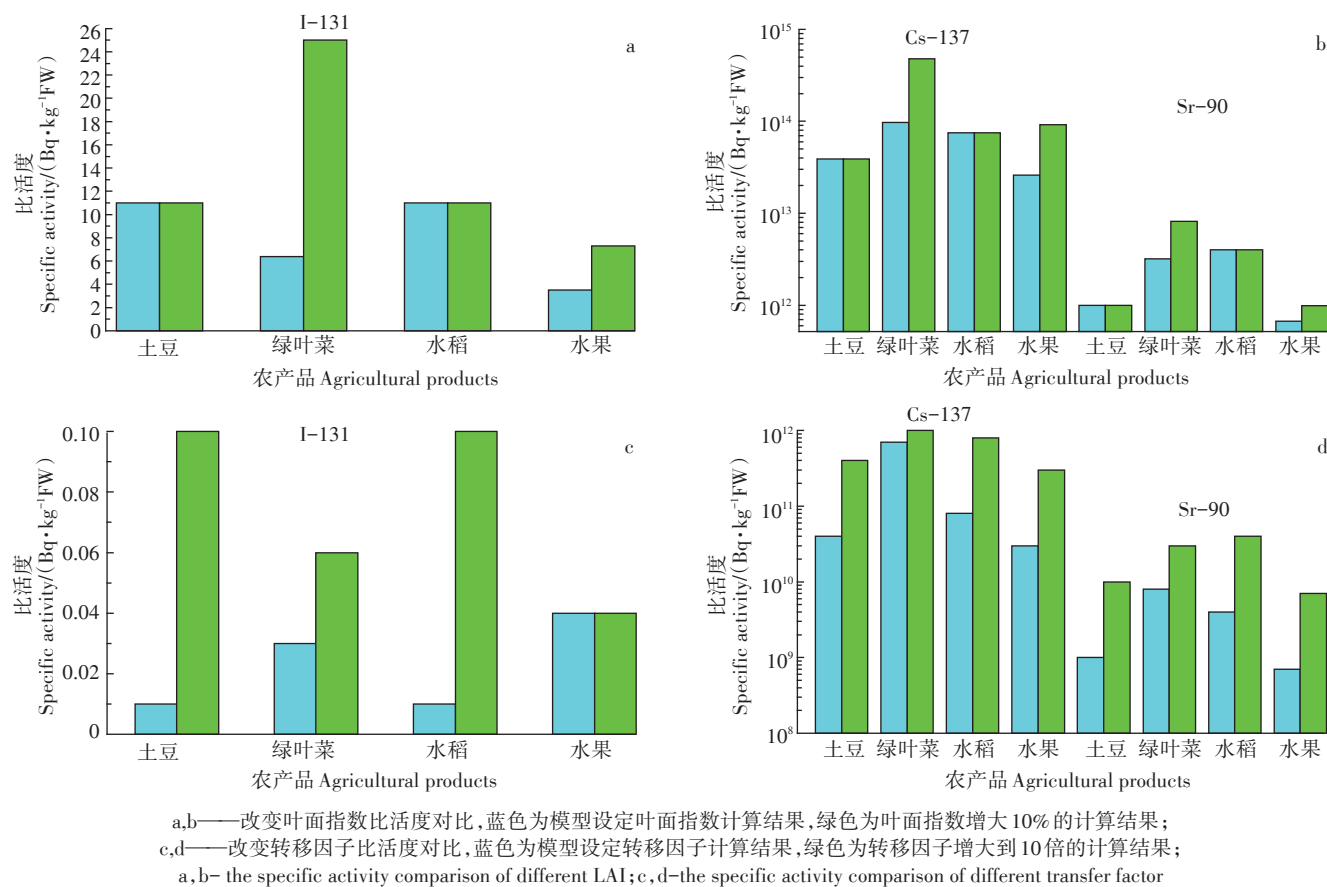


图8 AgrRAM 参数灵敏度测试结果对比

Figure 8 The comparison of AgrRAM parameter sensitive testing

表7 AgrRAM 和平衡模型关于核素¹³⁷Cs比活度对比
Table 7 The specific activity comparison of AgrRAM and equilibrium model about ¹³⁷Cs

农产品 Products	平衡模型/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ 平衡模型
冬小麦	7.86E-07	4.21E-07	0.54
中稻	7.38E-06	3.12E-06	0.82
土豆	2.06E-05	2.06E-05	1.00
燕麦	2.70E-05	9.81E-05	3.63
绿叶菜	1.77E-04	5.77E-04	3.26
薯类	1.10E-05	1.10E-05	1.00
瓜类菜	1.10E-05	1.10E-05	1.00
水果	1.15E-06	9.32E-06	0.81
浆果	1.15E-06	4.97E-07	0.43
牛奶	7.54E-06	9.02E-07	0.12
牛肉	1.88E-06	2.96E-07	0.16
鸡肉	3.34E-06	7.41E-07	0.22
羊肉	3.32E-06	5.32E-07	0.16
鸡蛋	4.19E-09	1.18E-09	0.28

表9 AgrRAM 和平衡模型关于核素⁹⁰Sr比活度对比
Table 9 The specific activity comparison of AgrRAM and equilibrium model about ⁹⁰Sr

农产品 Products	平衡模型/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ 平衡模型
冬小麦	5.07E-08	2.24E-08	0.30
中稻	4.76E-07	3.31E-07	0.69
土豆	1.33E-05	1.16E-05	0.87
燕麦	1.74E-05	4.75E-05	2.72
绿叶菜	1.14E-05	3.63E-05	3.18
薯类	7.09E-06	5.23E-06	0.74
瓜类菜	7.09E-06	7.98E-06	1.12
水果	7.42E-07	6.32E-07	0.85
浆果	7.42E-07	4.97E-07	0.67
牛奶	4.87E-07	1.02E-07	0.20
牛肉	1.21E-07	0.26E-07	0.21
鸡肉	2.16E-07	0.41E-07	0.18
羊肉	2.14E-06	5.32E-07	0.24
鸡蛋	2.70E-09	5.18E-10	0.19

是因为缺乏基础的生态参数和用于模型验证的监测数据。随着目前国际间的合作及大量基础研究的进行,模型相关的生态参数会更精确,模型的验证工作也会更有效。

4 结论

基于动态模型理论和食物链计算方法,建立了动态核事故农业后果评估模型 AgrRAM,并对田湾核电

表8 AgrRAM 和平衡模型关于核素¹³¹I比活度对比
Table 8 The specific activity comparison of AgrRAM and equilibrium model about ¹³¹I

农产品 Products	平衡模型/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ (Bq·kg ⁻¹ FW)	AgrRAM/ 平衡模型
冬小麦	6.01E-19	1.87E-19	0.31
中稻	3.39E-06	7.12E-06	2.10
土豆	6.07E-06	2.16E-06	0.36
燕麦	6.03E-06	6.11E-06	1.01
绿叶菜	8.12E-06	8.12E-06	1.00
薯类	1.07E-05	1.07E-05	1.00
瓜菜	1.07E-05	3.12E-05	2.92
水果	5.27E-06	1.78E-05	3.38
浆果	5.27E-06	1.11E-06	0.21
牛奶	2.61E-06	7.56E-07	0.29
牛肉	9.58E-09	3.67E-09	0.38
鸡肉	1.81E-09	6.98E-10	0.39
羊肉	7.77E-09	9.89E-09	1.27
鸡蛋	9.83E-11	4.33E-10	4.37

厂址进行了假想核事故农业后果的评估计算。AgrRAM 计算了事故后农产品中随时间、空间变化的比活度分布,定量描述了核事故后农业环境的辐射效应。模型应用研究中的主要结论如下:

(1)不同核事故发生时间对于农产品中活度影响很大,尤其对于短半衰期核素,事故发生在农作物生长期时,事故后果最严重。

(2)不同转移因子的取值导致活度水平最大达2个数量级的波动,说明转移因子对最终活度影响很大,尤其是在只有根吸收的情况下。不同生长期叶面指数的差异会影响最终活度水平。

(3)在相同条件下 AgrRAM 与传统平衡模型进行对比,对于农作物的比活度偏差在3倍左右,对于动物产品的比活度偏差在5倍左右,说明了 AgrRAM 结果的可靠性。

参考文献:

- [1] Baxter M S. Environmental contamination, radiation doses and health consequences after the chernobyl accident[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1997, 36(1): 107-108.
- [2] IAEA. The Fukushima Daiichi accident, technical volume 1, description and context of the accident[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015: 20-50.
- [3] FAO/IAEA. Response to nuclear emergency affecting food and agriculture[EB/OL]. (2018-01-20)[2020-11-13]. <http://www.iaea.org/nafa/swmn/crp/swmcn-nuclear-emergency-food.html>
- [4] Higley K A, Domotor S L, Antonio E J. A kinetic-allometric approach

- to predicting tissue radionuclide concentrations for biota[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2003, 66:61-74.
- [5] Higley K A, Bytwerk D P. Generic approaches to transfer[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, 98:4-23.
- [6] Bereford N A, Wood M D, Batlle J V, et al. Making the most of what we have: Application of a extrapolation approaches in radioecological wild-life transfer models[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 151:373-386.
- [7] Jones J A, Mansfield P A, Haywood S M, et al. PC Cosyma (Version 2): An accident consequence assessment package for use on a PC[R]. Luxembourg EUR 16239 EN, 2016.
- [8] USNRC. Code manual for MACCS2: Volume1: user's guide NUREG/CR-6613/SAND97-0594[R]. U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1997.
- [9] Raskob W, Trybushnyi D, Ievdin I, et al. JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management[J]. *Radioprotection*, 2011, 46(6):5731-5736.
- [10] Müller H, Gering F, Prohl G. Model description of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS PV6.0 RODOS(RA3)-TN (03) 06[EB/OL]. (2004-12-02)[2020-11-13]. https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/Documents/Public/HandbookV6/Volume3/FDM_Terra.pdf.
- [11] Liland A, Lind O C, Bartnicki J, et al. Using a chain of models to predict health and environmental impacts in Norway from a hypothetical nuclear accident at the Sellafield site[J]. *Journal of Environmental radioactivity*, 2020, 214(105):104-119.
- [12] Slavik O, Fulajtar E, Müller H, et al. Model for food chain transfer and dose assessment in areas of the Slovak Republic[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2001, 40(1):59-67.
- [13] 武海霞. 基于冠层分析仪的冬小麦叶面积指数测算及模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(3):34-40. WU Hai-xia. Variation regularity of winter-wheat leaf area index basing on plant canopy analyzer[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2010, 27(3):34-40.
- [14] 薛正平, 吴元中, 段项锁, 等. 一种估算水稻叶面指数的方法[J]. 气象, 1990, 16(7):23-29. XUE Zheng-ping, WU Yuan-zhong, DUAN Xiang-suo, et al. A method for estimating rice leaf area index [J]. *Meteorology*, 1990, 16(7):23-29.
- [15] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4):42-50. LIN Zhong-hui, XIANG Yue-qin, MO Xing-guo, et al. Normalized leaf area index model for summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4):42-50.
- [16] IAEA. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments, IAEA-TECDOC-1616, ISBN 978-92-0-104509-6[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010:100-175.
- [17] Fülöp N, Glavatszkii N, Kerekes dr A, et al. Review of the adequacy of the present food chain and dose calculations and collection of the data required for each radio ecological region and their integration into RODOS[EB/OL]. (2013-04-20)[2020-11-13]. <https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/Documents/Public/>
- [18] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇, 等. 中国农业地域分异与现代农业区划方案[J]. 地理学报, 2018, 73(2):203-218. LIU Yan-sui, ZHANG Zi-wen, WANG Jie-yong, et al. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2):203-218.
- [19] 连云港市统计局. 连云港统计年鉴2017[M]. 北京:中国统计出版社, 2017:102-110. Lianyungang Bureau of Statistics. Statistical yearbooks of the Lianyungang City's socialistic republic 2017[M]. Beijing:China Statistics Press, 2017:102-110.
- [20] 临沂市统计局. 临沂统计年鉴2017[R]. 北京:中国统计出版社, 2017:147-158. Lingyi Bureau of Statistics. Statistical yearbooks of the Linyi City's socialistic republic 2017[R]. Beijing:China Statistics Press, 2017:147-158.
- [21] 日照市统计局. 日照统计年鉴2017[R]. 北京:中国统计出版社, 2017:136-149. Rizhao Bureau of Statistics. Statistical yearbooks of the Rizhao City's socialistic republic 2017[R]. Beijing:China Statistics Press, 2017:136-149.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全标准GB 18871—2002[S]. 北京:中国标准出版社, 2003. General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the PRC. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources GB 18871—2002[S]. Beijing:China Standards Press, 2003.
- [23] IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments, IAEA technical reports series No. 472[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012:140-160.