doi: 10.11720/wtyht.2026.0009
易隆科, 杨波, 李冠超, 等. 基于“地理探测器”的珠三角地区地—空界面γ辐射场的空间分布差异影响机制研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 567-579. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0009
Yi L K, Yang B, Li G C, et al. Investigating mechanisms influencing the spatial variations of the gamma radiation field at the ground-air interface in the Pearl River Delta Economic Zone based on Geodetector[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 567-579. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0009

基于“地理探测器”的珠三角地区地—空界面γ辐射场的空间分布差异影响机制研究

易隆科[1], 杨波[2,3], 李冠超[2,3], 林小明[1], 胡颖[2,3]
(1. 广东省地质调查研究院, 广东 广州 510000; 2. 广东省地质试验测试中心(广东省矿产应用研究所), 广东 广州 510000; 3. 自然资源部 放射性与稀有稀散矿产重点实验室, 广东 广州 510000)

摘 要: 为探究珠三角经济区地—空界面γ辐射场的空间分布差异及影响机制, 整合多源放射性调查数据, 运用“地理探测器”开展了研究, 结果显示: 土壤氡浓度(解释力值 q=0.852)、^{238}U 含量(q=0.816)和^{232}Th 含量(q=0.803)是影响辐射场分布的关键因子, 岩性地层(q=0.791)、断裂构造(q=0.786)和年代地层(q=0.778)亦具显著影响; 交互探测表明, 土壤氡浓度与断裂构造的协同作用解释力最强(q=0.875), 形成“构造控运—土壤控集”机制; 风险探测识别出正断层、岩浆岩、侏罗系地层等高辐射贡献分级。研究揭示辐射场空间分布受“直接源—载体—构造通道”三级体系控制: 核素含量为直接来源, 岩性与年代地层为物质载体, 断裂构造为氡气运移通道。研究结果为区域辐射环境风险评估及污染防治提供了科学依据。

关键词: 珠江三角洲经济区; 地—空界面γ辐射场; 地理探测器; 影响机制
中图分类号: P631.1; P632; X825; X142 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)03-0567-13

0 引言

2023 年 8 月, 珠海中山大学辐射监测站 142 nGy/h 的空气吸收剂量率数据引发广泛热议[1], 该数值在全国居次位, 恰逢日本核污染水排海初期[2], 时间耦合效应加剧了公众焦虑。虽然有官方回应, 明确其与侏罗纪黑云母二长花岗岩高放射性本底相关[3], 但这一事件暴露出公众对区域辐射背景认知不足, 也凸显了科学解析γ辐射场分布机制的迫切性[1-2]。

珠三角位于东南沿海大陆边缘活动带, 历经多期岩浆活动, 辐射本底具有独特性和复杂性, 其中侏罗纪侵入岩最为发育(出露面积约 4 000 km^2, 占区域 10%), 形成于中生代构造—岩浆强烈活动期, 岩浆分异过程使铀(U)、钍(Th)等放射性核素高度富集, 岩体中^{238}U 含量达 80~200 Bq/kg, ^{232}Th 达 100~250 Bq/kg, 构成了辐射高本底的物质基础[4]; 中生代张性正断层系统发育[5], 不仅控制岩浆运移, 其裂隙网络还形成深部氡气上逸通道(氡作为铀衰变子体, 通过断裂通气裂隙向地表富集, 进一步抬升辐射水平), 形成“岩体供源—断裂输运”的天然辐射增强机制。

国内学者已对珠三角地区开展了一系列辐射调查研究工作, 曾庆卓等[6] 通过实地采样, 测量了广东省部分地区土壤中^{238}U、^{232}Th、^{40}K 等天然放射性核素的含量, 初步揭示了区域土壤放射性的基本特征; 富英杰等[7] 研究发现, 珠三角主要地区土壤中天然放射性核素含量普遍高于全国平均背景值; 孙勋杰

收稿日期: 2026-01-09; **修回日期**: 2026-03-10
基金项目: 广东省地质勘查与城市地质专项“广东粤东地区 1∶25 万区域地球化学调查与全省成果集成”(2023-25); 广东省市场监督管理局 2023 年第一批广东省地方标准制修订计划项目“《城市放射性地质调查技术规范》”(粤市监标准 [2023]211 号)
第一作者: 易隆科(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事城市地质、基础地质、矿产地质、环境地质相关的物探工作。Email: yilongke@126.com
通讯作者: 李冠超(1982-), 男, 正高级工程师, 主要从事城市地质、环境地质、矿产地质相关的放射性地质调查与评价工作。Email: 105877253@qq.com

等[8]长期监测了广东多地稻谷、蔬菜及耕作土中的放射性核素含量，为农产品安全评估提供了数据支撑；崔凡等[9]通过膳食调查估算了珠三角地区居民因食物摄入所致的内照射剂量，显示该区域内照射剂量明显高于全国平均水平；宋刚等[10]发现珠三角地区的芒箕和蜈蚣草两种植物对放射性核素具有超富集现象，为放射性污染修复提供了新思路。总体而言，现有研究取得了一定成果，但也存在调查对象单一、采样密度低、空间代表性不强、研究尺度有限、未能充分结合珠三角地区独特的地质背景进行研究、缺乏对放射性核素空间分布与地质本源因素关联性的深入分析、难以揭示影响辐射场分布的关键控制因子及其交互作用规律、难以满足区域辐射环境管理和精准防护的需求等问题。

本文通过整合多源调查数据，运用“地理探测器”等空间分析方法，系统识别了影响地—空界面 γ 辐射场（指离地 1 m 的 γ 辐射空气吸收剂量率）空间分布的关键因子，定量评估各因子的影响程度，揭示了各因子间的交互作用机制，可为区域辐射环境风险评估、优化土地规划利用、放射性污染防治等提供科学依据，能有效支撑相关部门开展精准管控，降低公众辐射暴露风险，对消除公众对辐射环境的疑虑、促进经济可持续发展具有重要的现实意义。

1　珠三角地区地质背景概况

珠江三角洲坐落于我国东南沿海大陆边缘，地质构造错综复杂，历经了“槽—台—洼”的地质演化历程及显著的断裂构造运动，在地质历史上跨越了古生代、中生代直至第四纪（见图 1）[5]。区内加里东期岩浆岩分布在高要、四会、广州增城与番禺等地，志留纪岩浆岩分布在四会、广州番禺及增城等地，泥盆—二叠纪侵入岩仅分布在高要市；燕山期的岩浆活动是珠三角地区最新一期的岩浆岩活动，从珠三角西部向东部呈现逐渐迁移并变新的趋势，早侏罗世侵入岩主要分布在广州—从化断裂带以西，中—晚侏罗世侵入岩则遍布珠三角中东部；火山岩从古生代至新生代在珠三角地区均有出露，从中部向东部有逐渐迁移变新的趋势，中生代的火山活动最为剧烈，尤其是侏罗纪和白垩纪时期；珠江三角洲地区的断裂形迹复杂多样，NE 向的断裂带都是区域性的深大断裂，对盆地构造架构的形成起到了关键作用，NW 向的断裂带大多被第四纪沉积层所覆盖，出露较少。

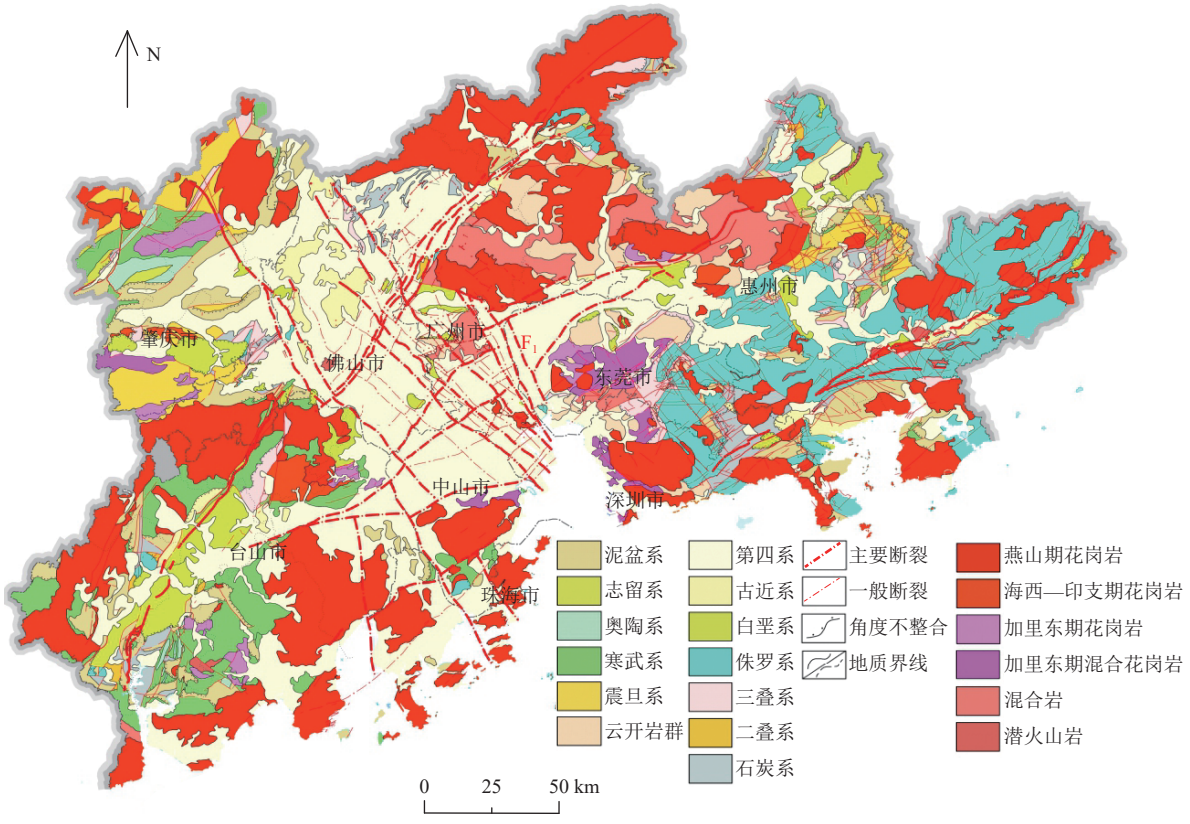


图 1　珠江三角洲地区地质简图

Fig. 1　Geological schematic map of the Pearl River Delta region

珠三角地区放射性环境质量总体良好[3,4,6-7,9,10]: 表层土壤中 K_2O 平均含量(2.07%)低于全国平均值(2.5%), 较贫乏区域占总面积的 19.58%; 从化、惠州、恩平、台山、中山、深圳等地的部分级域, 因燕山期花岗岩的出露, 土壤放射性核素(^{238}U、^{232}Th)含量较高; 空气吸收剂量率>90 nGy/h 的区域主要分布在从化、惠东、恩平等地, 与 U、Th 高值区一致; 地表水中的放射性核素主要来源于土壤及岩石风化后的淋溶作用, 四会大沙马岗围—大兴围地区的 U 含量达 1.38 μg/L, 台山都斛的 Th 含量达 0.56 μg/L, 还存在部分地区山泉水中 U 和 Th 含量较高的情况; 大部分建设用地(断裂构造带影响区域除外)的土壤氡浓度处于较低水平, 仅南部少部分级域的浓度均值达 3.2 kBq/m^3, 需采取防氡工程措施。

2　影响机制研究

2.1　研究方法

“地理探测器”是探测空间分异性背后成因的一种统计学方法, 能有效计算地理事件空间分布的影响因子解释力大小, 且无需考虑共线性问题。该探测器由 4 部分组成: 分异及因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互作用探测器[11], 其中分异及因子探测器用于探测 Y(如 γ 剂量率)的空间分异性, 以及探测某因子 X(如土壤氡气浓度、核素含量、土壤类型等)在多大程度上解释了属性 Y(γ 剂量率)的空间分异, 用 q 值度量, 见式(1); 风险探测器用于比较单个影响因子内不同分级指标之间的因变量 Y 属性均值是否有显著差异, 通过 T 检验来度量, 见式(2); 生态探测器用于比较两个不同的因子 X_1 和 X_2 对应变量 Y 的空间分异的影响是否有显著的差异, 通过 F 检验来度量, 见式(3); 交互作用探测器用于评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时对因变量 Y 的解释力是否会增加或减弱, 用 t 统计量来检验。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, \quad (1)$$

$$\text{其中} SSW = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2,\ SST = N\sigma^2;$$

$$T_{i,j} = \frac{A_i - A_j}{\sqrt{\frac{\sigma_i^2}{n_i} + \frac{\sigma_j^2}{n_j}}}; \quad (2)$$

$$F = \frac{n_{X_1}(n_{X_2} - 1)\sigma_{X_1}^2}{n_{X_2}(n_{X_1} - 1)\sigma_{X_2}^2}。 \quad (3)$$

式中: h=1,…,L, 为因子 X 的分级(因子分级见表 1); N_h 和 N 分别为层级 h 和全区的单元数; σ_h^2和σ^2分别为层级 h 和全区的 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差; q 的值域为 0~1, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强, q 值表示 X 解释了 q%×100 Y 的空间分布; A_i、A_j分别为 γ 辐射剂量率在不同分类地区的均值; σ_i^2、σ_j^2分别为 γ 辐射剂量率在不同分类地区的方差, n_i、n_j分别为 i 和 j 分级的样本量; n_{X_1}、n_{X_2}分别为影响因子 X_1 和 X_2 的样本量; $\sigma_{X_1}^2$、$\sigma_{X_2}^2$ 分别为影响因子 X_1 和 X_2 的方差。

2.2　研究数据资料来源

本文研究数据资料[4,10,12-15] 主要来源于: 珠江三角洲地区 1∶25 万综合地质编图; “广州市城市地质调查”项目中地表 γ 辐射空气吸收剂量率面积测量 298.7 km^2、剖面测量 75.2 km、土壤氡气浓度测量 230 km 成果数据; “珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查”项目中土壤样品测试数据 43 488 个(测试指标包含 U、Th、K_2O)、高值区查证数据 14 883 个(包含土壤、岩石、土壤氡浓度、空气氡浓度、γ 辐射空气吸收剂量率、土壤氡析出率等), 以及

表 1　地—空界面 γ 辐射场各影响因子分级

Table 1　Classification of the influence factors of the ground-air interface γ-radiation field

分级	氡浓度/(kBq·m^{-3})	^{238}U含量/(Bq·kg^{-1})	^{232}Th含量/(Bq·kg^{-1})	^{40}K含量/(Bq·kg^{-1})	第四系厚度/m	岩性地层	年代地层	断裂构造	土壤成土母质类型	土壤类型
1	≤10	≤40	≤50	≤400	0	沉积岩	南华系	正断层	第四纪松散沉积物	赤红壤
2	10~20	40~80	50~100	400~600	0~10	变质岩	震旦系	逆断层	沉积岩类风化物	水稻土
3	20~30	80~160	100~200	600~1 000	10~20	岩浆岩	寒武系	完整地层	火山岩类风化物	砖红壤
4	30~50	>160	>200	>1 000	20~30	土壤	泥盆系		侵入岩类风化物	红壤
5	>50				30~40		石炭系		变质岩类风化物	潮土
6					40~50		侏罗系			
7					>50		白垩系			
8							古近系			
9							新近系			
10							第四系			

土壤类型图、土壤成土母质类型图等成果资料；“中山市多要素城市地质调查”项目中空气吸收剂量率测量 800 km^2、土壤氡气测量 50 km 成果数据；“新会区城市地质调查”项目中空气吸收剂量率测量 400 km^2、土壤氡气测量 50 km 成果数据；“珠江三角洲基底断裂探查研究”项目中土壤氡气测量 300 km 及根据钻孔整合编制的珠三角第四系（土层）厚度数据；在珠三角地区开展的其他地质调查项目所完成的约 100 km 土壤氡气测量工作的成果数据。放射性相关数据采集及测量方式：γ 辐射空气吸收剂量率在离地 1 m 开展测量；土壤氡气浓度取气孔深 0.8 m 的土壤进行测量；土壤氡析出率在地表用聚焦罩采集后测量；土壤样品采集表层 0～20 cm 深度，数据分布如图 2 所示。

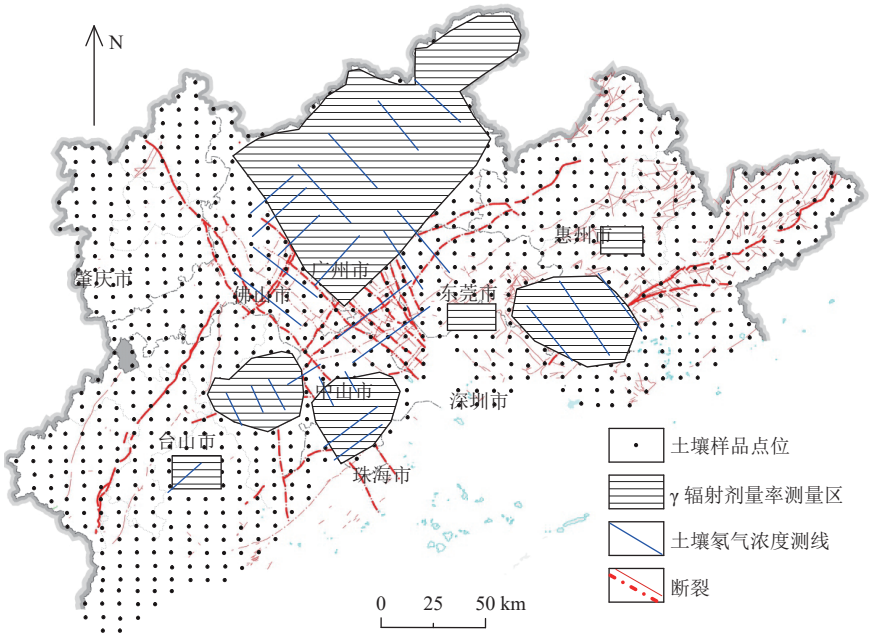


图 2　数据点位分布示意

Fig. 2　Schematic diagram of data point distribution

2.3　影响因子筛选及分级

2.3.1　影响因子筛选

地—空界面 γ 辐射场是指近地表空间（离地 1 m）γ 辐射总场，是直接反映人受辐射照射水平的关键因素，其分布水平情况主要受宇宙射线、表层岩土体放射性元素含量、地质构造发育及展布情况、表层土壤中氡浓度及储/通气条件等多重因素的影响，其中宇宙射线强度、表层岩土体放射性元素含量、土壤中的氡浓度是对地—空界面 γ 场的分布影响最为直接的因素，其他因素均为间接因素。

经综合分析公开发表的放射性相关文献及省内相关调查研究项目的成果资料[10-20]，影响珠三角地区地—空界面 γ 辐射场（Y 变量）空间分布的主要地质相关因子（X 变量）有岩性地层、年代地层、断裂构造、土壤氡气浓度、土壤核素含量、土壤成土母质类型、第四系（土层）厚度等（见表 1 中第一行列出的各影响因子），其中土壤氡气浓度、核素含量是地—空界面 γ 辐射场的直接来源，也是影响其空间分布差异的主要因素。

2.3.2　影响因子分级

据以往项目研究揭示的核素含量地质背景成因分析成果[4,10,15,17]，将土壤放射性核素含量分为 4 级（见表 1）；根据《民用建筑工程室内环境污染控制规范》（GB 50325—2020）中“4.2 工程地点土壤中氡浓度调查及防氡”，将土壤氡浓度分为 5 级[18]；珠江三角洲第四系均厚度范围主要在 10~30 m，基岩界面地形起伏较为和缓，自北向南增厚[15]，本文主要考虑第四系黏土对放射性元素的吸附作用及土壤厚度对底部基岩辐射的屏蔽作用，将第四系厚度按 10 m 间距等分划分为 7 级；珠江三角洲经济区土壤共分为 13 个土类，在 13 个土类中以赤红壤和水稻土分布面积最广，分别占陆域总面积的 44.8% 和 40.20%，其次为红壤、潮土和砖红壤，所占比例分别为 6.54%、4.77%、2.4%，其他类型土壤所占比例均不足 1%[19]，选取展布面积占比最大的前 5 种土壤类型作为分级（见表 1）；其余影响因子岩性地层、年代地层、断裂构造、土壤成土母质类型均按行业标准及惯例进行划分（见表 1）。

2.4　数据预处理

2.4.1　数据制备

本文研究收集的数据资料类型众多, 为满足“地理探测器”计算所要求的数据类型格式(同点位包含所有不同自变量(类型型)及因变量的数据(数值型))[4], 必须对收集到的数据进行筛选提取及转换处理。采用 MapGIS 软件, 首先对面积性数据进行网格化, 将其做成带属性的等值线图, 叠加至相应的地质底图上(其他类型图同样叠加在一起), 其次将剖面数据(主要是土壤氡气测量)带属性投影至平面图, 然后用图切剖面工具截取剖面上所有数据集的属性数据, 如图 3 所示, 即可获得同点位不同自变量及因变量数据, 最后按表 1 将自变量制备成类型变量, 其中地质图、土壤类型图、成土母质图的类型数据靠人工目视读取。

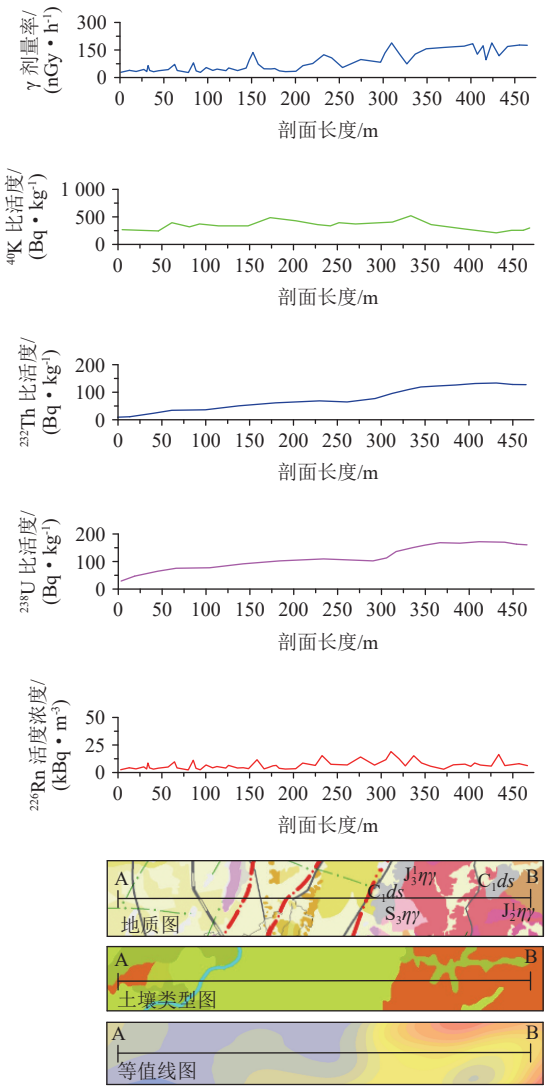


图 3　研究数据制备过程示意

Fig. 3　Schematic diagram of research data preparation process

2.4.2　统计分析

按上述数据制备方法将研究数据制备成可供“地理探测器”计算的数据体, 对各影响因子分级内对应的地—空界面 γ 辐射剂量率值进行分类描述性统计(见表 2), 并就各影响因子的分级合理性进行初步分析。

土壤氡气浓度、^{238}U 含量、^{232}Th 含量分级对应的 γ 辐射剂量率统计值均呈现出明显的梯度递增规律: 土壤氡气浓度随着浓度分级区间从≤10 kBq/m^3 到> 50 kBq/m^3, γ 辐射剂量率均值依次为 61.63、108.21、144.24、189.44、238.10 nGy/h; ^{238}U 含量分级从≤40Bq/kg 到 >160 Bq/kg, 均值依次为 69.74、127.53、167.93、229.53 nGy/h, ^{232}Th 含量分级从≤50 Bq/kg 到> 200 Bq/kg, 均值依次为 71.61、131.82、178.72、246.17 nGy/h; 均呈现稳定的递增趋势。土壤氡气浓度在低值区间(≤10、10～20、20～30、30～50 kBq/m^3), γ 辐射剂量率标准差相对稳定(11.59～13.85 kBq/m^3), 而在最高浓度区间(> 50 kBq/m^3), 其标准差升至 16.08kBq/m^3, 说明高浓度区域的氡气浓度分布离散程度更高, 表明存在局部异常高值点, 可能与地质构造所致氡富集有关; ^{238}U 含量分级对应的 γ 辐射剂量率标准差整体变化较稳定, 仅在 > 160 Bq/kg 区间其标准差上升至 16.11 Bq/kg; ^{232}Th 含量分级对应的 γ 辐射剂量率标准差波动程度也与 ^{238}U 相近, ^{232}Th 含量> 200 Bq/kg 区间时, 其标准差上升至 16.39 Bq/kg, 高值区间的离散程度略有增加, 疑与局部矿化作用有关。

^{40}K 含量的分级统计规律与上述 3 个因子存在明显差异: 含量分级从≤400 Bq/kg 到 400～600 Bq/kg 时, 对应的 γ 辐射剂量率均值从 125.26 nGy/h 略降至 122.66 nGy/h, 无明显提升; 在 600～1 000 Bq/kg 区间, 均值上升至 149.03 nGy/h; > 1 000 Bq/kg 区间, 均值大幅提升至 233.25 nGy/h; γ 辐射剂量率在对应的低含量区间分布较为均匀, 仅在高含量区间才出现明显的提升。γ 辐射剂量率标准差随^{40}K 含量区间升高逐渐减小, 从低区间的 33.91Bq/kg 降至高区间的 22.51Bq/kg, 高含量区间的分布反而更为集中, 说明^{40}K 的来源复杂, 与^{238}U、^{232}Th 继承原岩风化特性的基本来源存在明显差异[6]。

岩性分级内对应的 γ 辐射剂量率均值差异显著, 其中岩浆岩均值最高, 达 175.98 nGy/h, 其次是变质岩 130.90 nGy/h、沉积岩 111.85 nGy/h, 土壤均值最低, 仅 98.85 nGy/h, 岩浆岩的均值是土壤的 1.78 倍。在珠三角地区岩浆岩是放射性核素的重要载体, 其放射性水平远高于其他岩性。各岩性分

表 2　各影响因子分级内对应的地—空界面 γ 辐射剂量率值描述性统计

Table 2　Descriptive statistics of the corresponding ground-air interface γ radiation dose rate values within each influencing factor zone

影响因子	分级	辐射剂量率/(nGy·h^{-1})			
		最大值	最小值	均值	标准差
土壤氡气浓度/(kBq·m^{-3})	≤10	77	29	61.63	11.94
	10～20	125	78	108.21	13.85
	20～30	174	126	144.24	12.61
	30～50	220	175	189.44	11.59
	> 50	271	224	238.10	16.08
^{238}U含量/(Bq·kg^{-1})	≤40	90	29	69.74	14.36
	40～80	151	91	127.53	14.31
	80～160	213	152	167.93	14.47
	> 160	271	214	229.53	16.11
^{232}Th含量/(Bq·kg^{-1})	≤50	95	29	71.61	15.18
	50～100	161	96	131.82	15.74
	100～200	228	162	178.72	15.28
	> 200	271	234	246.17	16.39
^{40}K含量/(Bq·kg^{-1})	≤400	235	40	125.26	33.91
	400～600	236	29	122.66	32.98
	600～1 000	271	112	149.03	23.89
	> 1 000	263	213	233.25	22.51
第四系覆盖厚度/m	0	138	78	122.88	12.34
	0～10	140	85	99.35	13.47
	10～20	120	53	92.88	8.27
	20～30	113	35	90.83	6.76
	30～40	141	61	91.62	12.34
	40～50	110	29	86.99	13.11
	> 50	94	29	87.69	13.41
岩性地层	沉积岩	144	29	111.85	14.83
	变质岩	158	94	130.90	15.55
	岩浆岩	220	159	175.98	14.58
	土壤	133	29	98.85	14.83
年代地层	南华系	53	29	46.55	5.71
	震旦系	77	54	68.21	6.88
	寒武系	102	78	88.99	7.61
	泥盆系	126	103	116.43	6.61
	石炭系	211	127	167.84	7.10
	侏罗系	238	226	231.86	5.05
	白垩系	271	223	237.00	5.66
	古近系	224	160	190.04	6.80
	新近系	230	116	155.86	5.05
	第四系	138	68	118.88	5.66
断裂构造	正断层	271	192	248.31	17.11
	逆断层	260	110	169.98	18.63
	完整地层	190	29	80.83	19.39
土壤成土母质类型	第四纪松散沉积物	98	29	73.08	15.89
	沉积岩类风化物	168	99	134.13	16.65
	火山岩类风化物	198	169	183.58	3.16
	侵入岩类风化物	238	179	196.16	14.18
	变质岩类风化物	271	63	157.00	5.66
土壤类型	赤红壤	211	99	117.43	16.95
	水稻土	178	69	103.58	3.16
	砖红壤	168	99	94.13	16.65
	红壤	98	29	73.08	15.89
	潮土	161	29	71.82	15.74

级对应的 γ 辐射剂量率标准差较为接近(14.55～15.83 nGy/h),不同岩性分级其内部的放射性分布波动程度相近,说明岩性类型是控制放射性水平的核心因素,岩性之间的差异远大于岩性内部的差异。

地层年代分级从古老的南华系到最新的第四系,其对应的 γ 辐射剂量率均值呈现先持续升高后降低的趋势,南华系 γ 辐射剂量率均值最低,仅 46.55 nGy/h,之后逐渐升高,在白垩系达到最高(267.00 nGy/h),之后古近系、新近系 γ 辐射剂量率均值逐渐降低,第四系降至 118.88 nGy/h,中生代的侏罗系、白垩系地层放射性水平最高,对应燕山期岩浆活动的主要时期;各年代地层分级内对应的 γ 辐射剂量率标准差整体相对稳定(5.05～7.61 nGy/h),表明各年代地层内部的放射性分布波动较小,年代地层的形成时期(是否经历强烈岩浆活动)是控制放射性水平的主要因素。

断裂构造分级对应的 γ 辐射剂量率均值中,断层带的均值显著高于完整地层,正断层对应的均值最高,达到 248.31 nGy/h,逆断层对应的均值为 169.98 nGy/h,完整地层对应的均值最低,仅 80.83 nGy/h;正断层的放射性水平最高,是完整地层的 3.07 倍。γ 辐射剂量率标准差呈现完整地层> 逆断层>正断层的顺序,完整地层对应的标准差最大,达 19.39 nGy/h,正断层对应的标准差最小,仅 17.11 nGy/h,说明完整地层的放射性分布差异最大,断层带的放射性分布相对更稳定。

第四系覆盖厚度的分级内对应的 γ 辐射剂量率均值统计呈现出与厚度负相关的规律:无覆盖层(0 m)时均值达 122.88 nGy/h,随着覆盖层厚度增加,均值逐渐降低,在 20~30 m 区间降至最低 90.83 nGy/h,

之后厚度继续增加, 均值略有回升但整体维持在 87 nGy/h 左右, 说明覆盖层越薄, 放射性水平越高, 厚覆盖层对基岩放射性有明显的屏蔽作用; γ 辐射剂量率标准差在薄覆盖层(0～10 m)和厚覆盖层(30 m 以上)区间值较大, 在 20～30 m 区间标准差最小(6.76 nGy/h), 说明该厚度的覆盖层对放射性的屏蔽以及黏土层对核素的吸附, 两者的综合作用对地—空界面 γ 辐射场的贡献最稳定。

综上, 各影响因子分级内对应的地—空界面 γ 辐射剂量率水平均受地质背景的直接控制, 不同影响因子分级之间的差异远大于其内部的波动, 地质环境是放射性水平的核心控制因素; 岩浆岩、侏罗系、白垩系、断层带的平均放射性水平都显著高于其他分级, 其原因在于分级内的核素主要源于燕山期的岩浆活动; 除第四系覆盖厚度因子外, 岩性地层、年代地层、断裂构造等影响因子分级内部 γ 辐射剂量率标准差均相对稳定, 说明各影响因子分级内部的放射性分布较均匀, 表明各影响因子分级单元类型是控制放射性水平的主要因素, 影响因子分级合理。

2.5　结果分析

本文采用“地理探测器”软件包, 对珠三角地区地—空界面 γ 辐射场空间分异的影响机制进行量化解析, 从分异及因子探测、交互探测、风险探测及生态探测 4 个维度对结果展开分析。

2.5.1　分异及因子探测器结果分析

“地理探测器”的分异及因子探测结果如图 4 所示, 各影响因子对地—空界面 γ 辐射场空间分异的解释力(q 值)存在明显的层级差异, 可划分为核心控制因子(q>0.8)、重要影响因子(0.7<q<0.8)和次要影响因子(q<0.7)3 大类。

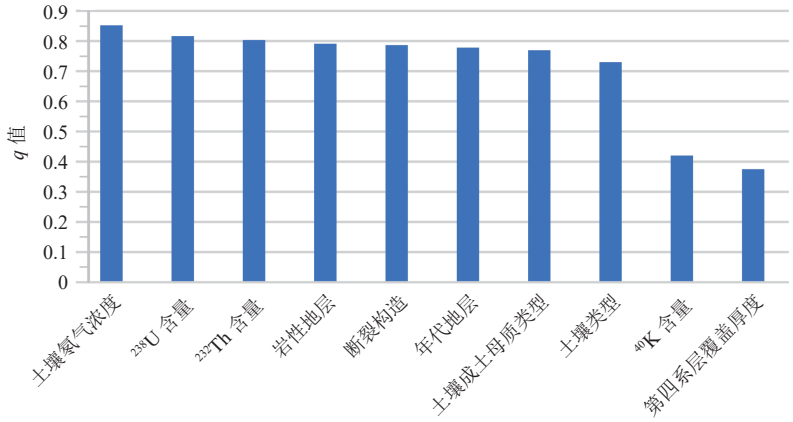


图 4　地—空界面 γ 辐射场分异及因子探测器结果

Fig. 4　Detection results of influence factors of γ radiation field at the ground-air interface

核心控制因子为土壤氡气浓度(q=0.852)、^{238}U 含量(q=0.816)、^{232}Th 含量(q=0.803), 是影响辐射场空间分异的决定性因素, 三者高 q 值的成因源于紧密的核素衰变链及地球化学关联: 氡作为^{238}U 衰变链的关键子体, 其浓度不仅受表层土壤中镭的直接控制, 还因其气态迁移特性可通过深部断裂裂隙向上运移并在表层土壤吸附富集, 形成“表层生成+深部补给”的双重来源, 故解释力略高于单一核素。^{238}U 与^{232}Th 化学性质相似(均为亲石元素), 在岩浆分异与表生风化过程中高度共伴生, 具有显著的空间分布一致性, 两者通过衰变释放 γ 射线, 对辐射场强度的贡献具有明显的协同作用, 是构成地—空界面 γ 辐射场的物质基础。

重要影响因子为岩性地层(q=0.791)、断裂构造(q=0.786)、年代地层(q=0.778)、土壤成土母质类型(q=0.769), 其通过控制核素初始富集与迁移路径影响辐射场分布: ①岩性地层的控制作用体现在不同岩石类型的核素本底差异, 岩浆岩(尤其是侏罗纪花岗岩)因岩浆分异作用富集 U、Th(w(U)=4.33×10^{-6}, w(Th)=24.18×10^{-6}), 显著高于沉积岩(w(U)=2.86×10^{-6}, w(Th)=14.24×10^{-6})和变质岩(w(U)=3.76×10^{-6}, w(Th)=17.46×10^{-6}); 第四纪松散沉积物因表生氧化作用(U^{4+}→U^{6+})增强土壤吸附性, U 含量(4.68×10^{-6})甚至略高于原岩, 体现“源岩继承+表生富集”的双重效应[4]; ②断裂构造中, 正断层(张性断裂)作为深部氡气上逸与岩浆运移的关键通道, 其裂隙网络改善通气条件, 促进深部高放射性物质向表层迁移, 形成“构造控运”机制; ③年代地层的影响则与岩浆活动时代密切相关(侏罗纪作为区内最新一期强烈岩浆活动期, 核素衰变时间短、保留度高), 其

地层放射性显著高于古老地层，印证“年代越新、核素保留越完整”的衰变规律；④土壤成土母质与岩性地层空间分布高度相似（生态探测验证），其高 q 值源于对母岩核素的继承性，进一步印证地质背景对表层辐射场的控制作用。

次要影响因子为^{40}K 含量（q=0.420）与第四系覆盖厚度（q=0.374），因其作用机制独立于核心因子，解释力较低，^{40}K 的低贡献源于两点：一是珠三角地区土壤 K_2O 平均含量（2.07%）低于全国水平，且高值区与花岗岩分布无显著空间关联；二是在^{238}U、^{232}Th、^{40}K 3 个主要基础核素中，^{40}K 对地—空界面 γ 辐射场的直接贡献占比仅 15.87%[4]，且来源受农业施肥等人为因素干扰，空间分异规律模糊；第四系覆盖的屏蔽作用存在阈值效应，当厚度超过 10 m 后，表层土壤对下部基岩辐射的屏蔽趋于稳定，且平原区第四系沉积物核素整体贫化，故厚度变化对辐射场影响有限。

2.5.2 交互探测结果分析

交互探测结果（表 3）揭示，多因子协同作用对地—空界面 γ 辐射场的解释力显著高于单一因子，其中土壤氡浓度∩断裂构造（采用 A∩B 的形式表示 A、B 因子的交互作用）的交互 q 值高达 0.875，为所有组合中最高，印证“物质基础—运移通道”的耦合机制[21]。

表 3 交互式作用探测结果

Table 3 Interactive detection results

影响影子	土壤氡浓度/（kBq·m^{-3}）	^{238}U含量/（Bq·kg^{-1}）	^{232}Th含量/（Bq·kg^{-1}）	^{40}K含量/（Bq·kg^{-1}）	第四系覆盖厚度/m	岩性地层	年代地层	断裂构造	土壤母质类型	土壤类型
土壤氡浓度/（kBq·m^{-3}）	0.852									
^{238}U含量/（Bq·kg^{-1}）	0.861	0.816								
^{232}Th含量/（Bq·kg^{-1}）	0.825	0.852	0.803							
^{40}K含量/（Bq·kg^{-1}）	0.161	0.331	0.193	0.420						
第四系覆盖厚度/m	0.137	0.208	0.215	0.280	0.375					
岩性地层	0.628	0.844	0.822	0.303	0.314	0.791				
年代地层	0.720	0.762	0.766	0.262	0.176	0.766	0.778			
断裂构造	0.875	0.686	0.651	0.198	0.127	0.861	0.764	0.786		
土壤成土母质类型	0.611	0.674	0.614	0.179	0.115	0.730	0.765	0.319	0.769	
土壤类型	0.511	0.804	0.714	0.379	0.215	0.830	0.765	0.519	0.569	0.730

核心交互机制：断裂构造通过张性裂隙为深部氡气提供运移通道，而土壤颗粒的吸附作用（由表面积与孔隙度控制）则将运移至表层的氡气富集，形成“构造控运—土壤控集”的协同效应，不仅放大了单一因子的影响，更解释了辐射高值区与断裂带的空间吻合性（如珠三角地区的正断层发育区土壤氡浓度显著高于其他区）。

其他关键协同组合：^{238}U∩^{232}Th（q=0.852）、岩性地层∩^{238}U（q=0.844）的高 q 值，印证核素共、伴生特性（U 与 Th）及岩性对核素的载体作用（岩性通过控制初始富集影响核素含量），进一步支撑“岩性—核素—辐射场”的传导链。

低效交互组合：^{40}K、第四系厚度与其他因子的交互 q 值普遍低于 0.3，表明次要因子难以通过协同作用提升解释力，其独立作用机制与核心因子体系无显著耦合。

2.5.3 风险探测结果分析

风险探测通过 t 检验验证了影响因子分级的合理性，并可识别出辐射高风险子区，为后续的防护对策研究提供依据及靶点，结果分析如下：

土壤氡浓度>50 kBq/m^3 分级（γ 辐射剂量率均值 238.10 nGy/h）、^{238}U 含量>160 Bq/kg 分级（γ 辐射剂量率均值 229.53 nGy/h）、^{232}Th 含量>200 Bq/kg 分级（γ 辐射剂量率均值 246.17 nGy/h）的辐射均值显著高于低等级分级，且呈严格正相关，证实核素含量是辐射强度的直接决定因素；岩浆岩分级（γ 辐射剂量率均值 175.98 nGy/h）显著高于沉积岩（γ 辐射剂量率均值 111.85 nGy/h）与变质岩（γ 辐射剂量率均值 175.98 nGy/h），印证花岗岩等高放射性母岩的控制作用；侏罗纪地层分级作为岩浆活动最强烈的时代单元，γ 辐射剂量率均值（231.86 nGy/h）远高于其他地层，与“年代越新、核素保留越完整”的规律一致；正断层分级（γ 辐射剂量率均值 248.31 nGy/h）显著高于逆断层（γ 辐射剂量率均值 169.98 nGy/h）及完整地层（γ 辐射剂量率均值 80.83 nGy/h），直接证实张性断裂对氡气与核素富集的“通道效应”；年代地层中新近系（γ 辐射剂量率均值 155.52 nGy/h）与第四系（γ 辐射剂量率均值 118.88 nGy/h）差异不显著，因两者均以松散沉积为主，核素贫化且受后期改造强烈。风险探测结果进一步支撑了影响因子分级的科

学性。

2.5.4　生态探测结果分析

生态探测通过 F 检验揭示因子间的作用差异性(Y 表示“是”, N 表示“否”), 将影响因子划分为协同因子群与独立因子(见表 4): 土壤氡浓度、^{238}U、^{232}Th、岩性地层、土壤成土母质、土壤类型之间无显著差异(N), 表明它们属于同一作用体系(核素含量受岩性与母质控制), 土壤类型通过继承母岩特性间接关联, 形成“核素—岩性—土壤”的协同控制链, 如赤红壤(成土母岩以花岗岩为主)的 γ 辐射剂量率均值(227 nGy/h)显著高于水稻土(134.13 nGy/h), 反映母岩放射性差异的继承性; 第四系厚度、^{40}K、年代地层与其他因子存在显著差异(Y), 其中, 第四系厚度的屏蔽作用、^{40}K 的多源干扰、年代地层的衰变规律均独立于核心协同体系, 体现辐射场分异的多机制特性(珠三角平原区第四系覆盖厚度超过 30 m 的区域, 因屏蔽效应, γ 辐射剂量率低于周边基岩出露区)。

表 4　生态探测结果

Table 4　Ecological detection results

影响因子	土壤氡浓度/(kBq·m^{3})	^{238}U含量/(Bq·kg^{-1})	^{232}Th含量/(Bq·kg^{-1})	^{40}K含量/(Bq·kg^{-1})	第四系覆盖厚度/m	岩性地层	年代地层	断裂构造	土壤成土母质类型	土壤类型
土壤氡浓度/(kBq·m^{-3})										
^{238}U含量/(Bq·kg^{-1})	N									
^{232}Th含量/(Bq·kg^{-1})	N	N								
^{40}K含量/(Bq·kg^{-1})	N	N	N							
第四系覆盖厚度/m	Y	Y	Y	Y						
岩性地层	N	N	N	Y	N					
年代地层	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
断裂构造	N	N	N	Y	N	N	N			
土壤成土母质类型	N	N	N	Y	N	N	N	Y		
土壤类型	N	N	N	Y	N	N	N	Y	N	

3　讨论

本研究通过“地理探测器”建立了基于多源数据的 γ 辐射场影响因子体系, 研究了各地质因子对珠三角地区地—空界面 γ 辐射场分区差异的解释力, 发现了岩性地层、断裂构造、土壤成土母质类型等控制其空间分布差异的关键影响因子, 揭示了土壤氡气浓度与断裂构造的协同作用(q=0.875)对 γ 辐射区具有强烈的双因子增强效应, 可有效提高人们对珠三角地区地—空界面 γ 辐射场形成机制的全面性认识。

3.1　岩浆岩与正断层是控制珠三角地区地—空界面 γ 辐射场空间分布差异的关键因素

风险探测结果揭示: 岩浆岩分级中, γ 辐射剂量率均值为 175.98 nGy/h, 其中侵入岩类风化物分级(在珠三角地区, 其主要由花岗岩风化而成), 均值为 196.16 nGy/h, 明显高于其他因子分级; 正断层分级中, 均值为 248.31 nGy/h; 表明岩浆岩(在珠三角地区, 岩浆岩中花岗岩占比约为 95%[5])的分布和断裂构造的发育是导致珠三角地区地—空界面高 γ 辐射场形成的关键因素。其核心原因在于珠三角地区广泛分布的燕山期花岗岩体富含铀、钍等放射性元素, 是地—空界面 γ 辐射场的主要源区(其平均含量分别是全国平均值的 2.5 倍)[5], 也是导致珠海等地 γ 辐射水平位居全国前列的主要原因; 同时, 珠三角地区经历了多期构造运动[5], 不同时期的构造活动对放射性物质载体的分布产生了显著的影响, 燕山运动期间的大规模岩浆活动形成了大量花岗岩体, 为区域提供了丰富的放射性源; 喜马拉雅运动期间的断裂活动则为氡气的运移提供了通道, 促进了深部放射性物质向地表的迁移, 多期构造作用的叠加效应使得珠三角地区的 γ 辐射场呈现出复杂的空间分布特征。

3.2　氡与断裂构造协同作用机理

分异及因子探测结果显示: 土壤氡气浓度(q=0.852)与断裂构造(q=0.786)影响因子对 γ 辐射场的空间分布都具有极高的解释力。风险探测结果显示: 土壤氡浓度>50 kBq/m^{3} 分级中, γ 辐射剂量率均值 238.10 nGy/h; 正断层分级中, 均值为 248.31 nGy/h; 表明土壤氡气浓度与断裂构造影响因子对 γ 辐射高值场的形成均可能存在成因关联。交互探测结算结果显示: 土壤氡浓度∩断裂构造的交互 q 值高达 0.875, 表明氡浓度与断裂构造对珠三角地区地—空界面 γ 辐射场空间分布具有强烈的协同增强作用。

白坭—沙湾断裂(F_1)是珠江三角洲地区一条重要的 NW 向断裂带，主要发育于白垩系和侏罗纪花岗岩中，由一组 NW 向断裂组成，区内延伸约 70 km，影响宽度约 25 km，断裂走向 290°~320°(见图 1)，倾向以 SW 为主，宽几米至几十米，断裂带内岩石破碎程度高。这条较宽的破碎带断裂构造不仅为氡气提供了运移通道，还通过改变地质环境来影响 γ 辐射场的分布特征，现以本文研究采用的数据制备方法截取珠三角地区具代表性的白坭—沙湾断裂北段某区域土壤氡气浓度、γ 辐射剂量率数据，并结合地质资料绘制综合协同作用模型(图 5)，氡与断裂构造对 γ 辐射高值场协同作用机理阐明如下：

首先，断裂构造控制了深部岩体中氡气的产生和释放。断裂活动导致岩石破碎，使原本封闭在矿物晶格中的放射性元素暴露在新的环境中，增加了岩石的表面积和孔隙度，从而提高了放射性元素的暴露程度和氡气的产生速率，致使断裂附近岩石的射气性能增强，同时，断层面还是携带 U、Th 等核素岩浆/热液的重要成矿结构面，断裂带内的放射性元素丰度往往高于其他完整地层。

其次，断裂构造控制了氡气的运移路径和聚集区域。断裂带作为岩石中的薄弱区域，具有较高的渗透性，成为氡气运移的优势通道，氡气沿断裂带向上迁移，在浅部土壤中被土壤胶体吸附形成氡聚集，进而导致地表 γ 辐射场的增强；断裂的几何形态、连通性、活动性等特征也均影响氡气的运移效率和聚集位置，在断裂构造上方，由于氡气的大量聚集，进而形成 γ 辐射的高值异常区(断裂中心位置所测氡最大峰值为 35.2 kBq/m^3，γ 辐射场最大峰值为 241.53 nGy/h，约为背景值的 2.8 倍，且两者在空间上重叠，见图 5)。

此外，断裂构造还通过影响水文地质条件间接影响 γ 辐射场，断裂活动改变了地下水的流动系统，地下水的流动可以携带溶解的氡气快速迁移，在断裂带附近，地下水的氡浓度往往较高[21]，地下水在向地表排泄的过程中会释放氡气，增强地表的 γ 辐射场。

3.3　“地理探测器”方法的适用性评价

“地理探测器”方法与传统的统计分析方法相比，具有以下优势：无需对变量间关系做线性假设，能够处理复杂的非线性关系，对于理解受多因子复杂控制的 γ 辐射场成因尤为重要；“地理探测器”通过 4 个探测器的有机结合，能够从不同角度全面揭示空间分异性的特征和机制；q 值直接表示影响因子

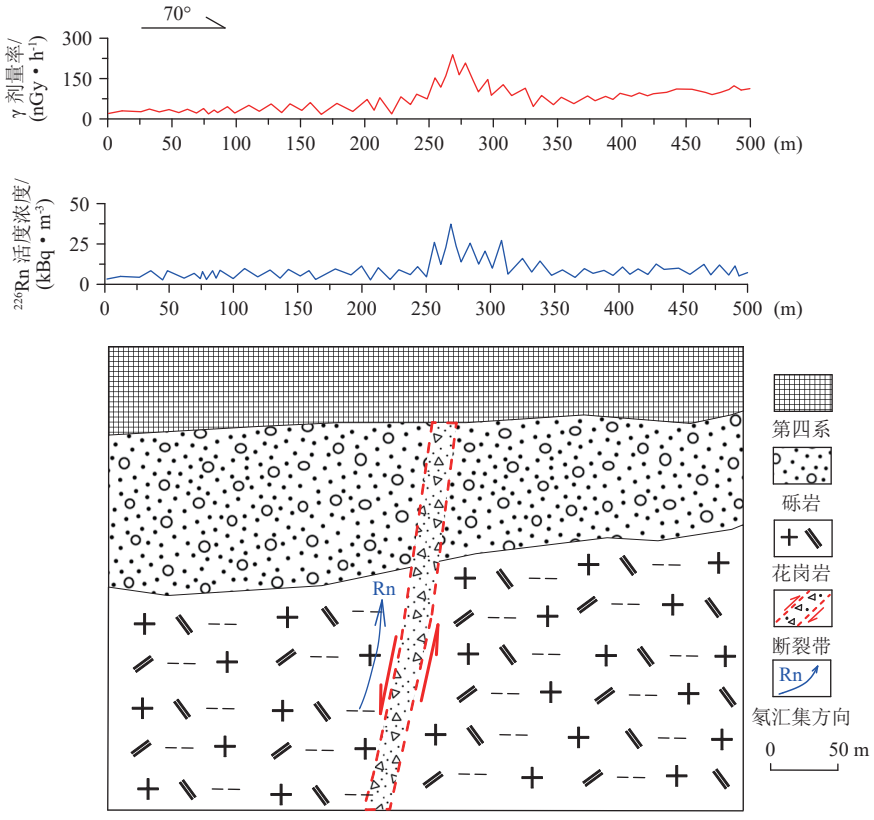


图 5　白坭—沙湾断裂氡与断裂协同增强地—空界面 γ 辐射场作用模型

Fig. 5　Model of the cooperative enhancement effect of radon and faults on the gamma radiation field at the ground-air interface in the Baini-Shawan Fault

的解释力, 物理含义明确, 便于不同研究之间的比较和验证。

“地理探测器”方法在应用中也存在一些局限性: 该方法要求自变量为类型量或经过离散化处理的连续量, 可能导致信息的损失; 在本文研究中, 土壤氡浓度和核素含量等连续变量经过分级处理后, 虽然保留了主要的空间特征, 但可能丢失一些细节信息; “地理探测器”主要揭示变量间的统计关联性, 虽然高 q 值表明因子对 γ 辐射场分布有重要影响, 但并不能直接证明因果关系的存在。针对其局限性, 本文建议在后续的研究中, 可采用自然断点法对连续变量进行分级, 可最大限度地保留数据的内在特征; 对于因果关系推断问题, 应结合地质成因和已有研究成果进行综合分析判断。

3.4　防护建议

根据以往成果资料[3,4,6-10,21], 珠三角地区主要存在以下几方面的放射性地质环境问题: 从化、惠州、恩平、台山、中山、深圳、珠海等地的部分区域, 土壤放射性核素(^{238}U、^{232}Th)含量高; 从化、惠东、恩平、中山部分地区存在空气吸收剂量率>90 nGy/h 的较大面积区域; 深圳石岩等地区存在土壤氡浓度高值区。依据本文的研究成果, 拟提出以下防护对策建议:

1)针对放射性高背景岩土体(岩浆岩、正断层、侏罗纪地层、侵入岩类风化物、赤红壤等), 应对其加强高监测与管控, 评估其天然放射性核素含量, 制定相应的辐射防护标准和管控措施; 合理规划土地利用, 在高放射性背景区域减少建设用地规划, 应采取低放射性客土回填或混凝土固封屏蔽等措施。

2)加强断裂构造对放射性环境的影响评估, 包括断裂的位置、走向、埋深、活动性以及与深部岩层之间的通气条件等; 在重点区域布设辐射环境监测网络, 监测土壤、地下水中的氡(^{222}Rn)浓度变化, 划分不同的辐射风险警示等级; 在建设用地选址时, 应避免张性断裂等地质构造区域, 无法避开时, 应采取降低氡气析出的措施; 对于张性断裂影响区域内的建成区, 应采取增强通风或防氡土层等措施。

4　结论

本文采用“地理探测器”对影响珠三角地区地—空界面 γ 辐射场分布的多种因子进行了深入分析研究, 首次量化了珠三角地区地质因子与地—空界面 γ 辐射场的关联强度, 弥补了现有研究中“地质背景—辐射分布”关联脱节的不足, 并基于上文研究结果, 就影响珠三角地区地—空界面 γ 辐射场空间分布差异的机制总结如下:

1)珠三角地—空界面 γ 辐射场空间分布差异是受多因子共同作用的结果, 其中, 土壤氡浓度、^{238}U 含量、^{232}Th 含量(q>0.8)为核心控制因子, 通过核素衰变与地球化学关联直接决定 γ 辐射场强度; 岩性地层、断裂构造等(0.7<q<0.8)为重要影响因子, 通过控制核素初始富集与迁移路径发挥作用; ^{40}K 含量、第四系覆盖厚度(q<0.7)为次要因子, 分别通过屏蔽效应、多源干扰发挥作用, 但因含量偏低、作用机制独立且存在阈值效应, 对辐射场分异影响有限。

2)各影响地—空界面 γ 辐射场分布的因子之间存在显著的协同作用, 多因子协同作用对地—空界面辐射场空间分布的解释力显著高于单一因子, 其中土壤氡浓度∩断裂构造的 q 值最高(0.875), 形成“构造控运—土壤控集—γ 辐射高值区”的耦合效应; ^{238}U∩^{232}Th、岩性地层∩^{238}U 的高交互 q 值, 构建了“岩性—核素—γ 辐射场”的传导链。

3)各影响因子内部分级中, 对地—空界面 γ 辐射场贡献值大小依次排序为: 正断层、岩浆岩、侏罗纪地层、侵入岩类风化物、赤红壤等, γ 辐射高值区主要集中在侏罗纪花岗岩分布区、正断层发育区及花岗岩母质土壤区, 在进行辐射水平调查或制定辐射防护方案时, 应重点关注正断层、岩浆岩等关键地质要素。

参考文献(References):

[1] 澎湃新闻. 珠海核辐射数值排全国第二引热议?[EB/OL]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_24393456.
The Paper. Zhuhai's nuclear radiation index ranking second in the country has sparked heated discussions?[EB/OL]. http: //https://m.thepaper.cn/baijiahao_24393456.

[2] 百度百科. 福岛核电站辐射水泄漏事件. [EB/OL]. 2025. https://baike.baidu.com/item/%E7%A6%8F%E5%B2%9B%E6%A0%B8%E7%94%B5%E7%AB%99%E8%BE%90%E5%B0%84%E6%B0%B4%E6%B3%84%E6%BC%8F%E4%BA%8B%E4%BB%B6/9689033?fr=aladdin.
Baidu encyclopedia. Water leak fukushima radiation. [EB/OL]. 2025. https://baike.baidu.com/item/%E7%A6%8F%E5%B2%9B%E6%A0%B8%E7%94%B5%E7%AB%99%E8%BE%90%E5%B0%84%E 6%B0%B4%E6%B3%84%E6%BC%8F%E4%BA%8B%E4%BB%B6/9689033?fr=aladdin.

[3] 王南萍, 肖磊, 刘少敏, 等. 广东珠海地表介质中^{238}U、^{232}Th 和^{40}K 的活度水平 [J]. 同位素, 2005, 18(1): 73−78.
Wang N P, Xiao L, Liu S M, et al. ^{238}U, ^{232}Th and ^{40}K radioactivity level of soil and concrete floor in Zhuhai, Guangdong Province, China[J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(1): 73−78.

[4] 杜海燕, 赖启宏. 珠江三角洲经济区—农业与生态地球化学调查

[R]. 广州: 广东省地质调查院, 2012.
Du H Y, Lai Q H. Agricultural and ecological geochemical investigation in the Pearl River Delta Economic Zone[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2012.

[5] 庄文明, 黄宇辉, 等, 广东省及香港、澳门特别行政区区域地质志 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2024.
Zhuang W M, Huang Y H, et al. , Regional geology of Guangdong Province and the Hong Kong and Macao Special Administrative Regions[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2024.

[6] 曾庆卓, 陈联光, 郑伟. 广东省土壤中天然放射性核素含量调查研究 [J]. 辐射防护, 1993, 13(5): 372−375.
Zeng Q Z, Chen L G, Zheng W. Investigation of natural radionuclide contents in soil in Guangdong Province[J]. Radialization Protection, 1993, 13(5): 372−375.

[7] 富英杰, 宋刚, 陈迪云, 等. 珠三角土壤^{238}U、^{226}Ra、^{232}Th 和^{40}K 含量水平研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18582−18584.
Fu Y J, Song G, Chen D Y, et al. Studies on ^{238}U, ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K levels of topsoils in Pearl River Delta zone[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(30): 18582−18584.

[8] 孙勋杰, 梁贵渊, 陈万良, 等. 广东省稻谷、蔬菜及耕作土中总放射性水平调查研究 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(5): 97−106.
Sun X J, Liang G Y, Chen W L, et al. Investigation on gross radioactivity levels in paddy, vegetables and cultivated soil in Guangdong Province[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(5): 97−106.

[9] 崔凡, 刘彦兵, 吴自香, 等. 珠三角地区食品中天然放射性核素^{238}U、^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 所致居民内照射剂量估算 [J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(3): 282−283.
Cui F, Liu Y B, Wu Z X, et al. Estimation of internal radiation dose of residents caused by natural radionuclides ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra and ^{40}K in food in Pearl River Delta region[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2017, 26(3): 282−283.

[10] 宋刚, 陈迪云, 富英杰, 等. 珠三角地区植物中天然放射性核素水平 [C]//上海: 2010 中国环境科学学会学术年会论文集, 2010: 942−946.
Song G, Chen D Y, Fu Y J, et al. Natural radioactive nuclei levels in plants in the Pearl River Delta Region [C]// Shanghai: 2010 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences, 2010: 942−946.

[11] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116−134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116−134.

[12] 庄文明, 黄宇辉, 林小明, 等. 广州市城市地质调查 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2015.
Zhuang W M, Huang Y H, Lin X M, et al. Urban geological survey of Guangzhou City[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2015.

[13] 姜守俊, 涂世亮, 李森, 等. 新会区城市地质地质调查 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2022.
Jiang S J, Tu S L, Li S, et al. Urban geological survey of Xinhui District[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2022.

[14] 林小明, 张献河. 中山市多要素地质地质调查 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2022.
Lin X M, Zhang X H.Multi-element geological survey of Zhongshan City[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2022.

[15] 许汉森, 林小明. 珠江三角洲基底断裂探查研究 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2021.
Xu H S, Lin X M.Exploration and research on basement faults in the Pearl River Delta[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Geological Survey, 2021.

[16] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国土壤中天然放射性核素含量调查研究(1983~1990 年)[J]. 辐射防护, 1992, 12(2): 122−142.
The Writing Group for the Summary Report on Nationwide Survey of Environmental Radioactivity Level in China. Investigation of natural radionuclide contents in soil in China (1983~1990)[J]. Radialization Protection, 1992, 12(2): 122−142.

[17] 杨晶, 胡茂桂, 钟少颖, 等. 全国 γ 辐射剂量率空间分布差异影响机理研究 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 625−634.
Yang J, Hu M G, Zhong S Y, et al. Influencing mechanism of spatial distribution difference in national γ radiation dose rate based on geographical detector[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(5): 625−634.

[18] GB 503256—2020 民用建筑室内污染物控制标准 [S]. 2020.
GB 503256—2020 Standard for control of indoor pollutants in civil buildings[S]. 2020.

[19] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Guangdong Province Soil Census Office. Guangdong soil[M]. Beijing: Science Press, 1993.

[20] GB 6566—2010 建筑材料放射性核素限量 [S]. 2010.
GB 6566—2010 Limitations on radioactive nuclei content in building materials [S]. 2010.

[21] 董好刚, 黄长生, 陈雯, 等. 珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析 [J]. 中国地质, 2012, 39(2): 539−549.
Dong H G, Huang C S, Chen W, et al. The controlling factors of environment geology in the Pearl River Delta Economic Zone and an analysis of existing problems[J]. Geology in China, 2012, 39(2): 539−549.

Investigating mechanisms influencing the spatial variations of the gamma radiation field at the ground-air interface in the Pearl River Delta Economic Zone based on Geodetector

YI Long-Ke[1], YANG Bo[2,3], LI Guan-Chao[2,3], LIN Xiao-Ming[1], HU Ying[2,3]

（1. *Guangdong Geological Survey Institute*, *Guangzhou* 510000, *China*; 2. *Guangdong Geological Experiment and Testing Center* (*Guangdong Institute of Mineral Resources Application*), *Guangzhou* 510000, *China*; 3. *Key Laboratory of Radioactive and Rare Scattered Minerals*, *Ministry of Natural Resources*, *Guangzhou* 510000, *China*）

Abstract: By integrating multi-source radioactivity survey data and using Geodetector, this study explored the spatial variations of the gamma radiation field at the ground-air interface and their influence mechanisms in the Pearl River Delta economic zone. The results indicate that key factors influencing the distribution of the radiation field include soil radon concentration (q=0.852), ^{238}U content (q= 0.816), and ^{232}Th content (q=0.803). Besides, formation lithology (q=0.791), fault structures (q=0.786), and chronostratigraphy (q =0.778) also play a significant role. The interaction detection indicates that the synergy of soil radon concentration and fault structures demonstrates the strongest explanatory power (q=0.875), suggesting the mechanism of structure-controlled transport and soil-controlled accumulation. Risk detection demonstrates that high-radiation radon contributors include normal faults, magmatic rocks, and Jurassic strata. The results of this study reveal that the spatial distribution of the radiation field is governed by a three-level system comprising nuclide content as a direct source, lithology and chronostratigraphy as carriers, and fault structures as pathways for radon transport.The research results have provided a scientific basis for regional radiation environmental risk assessment and pollution prevention and control.

Key words: Pearl River Delta Economic Zone; gamma radiation field at the ground-air interface; geodetector; influence mechanism

（本文编辑: 蒋实）