

放射性气体氡对植物的生理损伤: 以贝可利空凤为例

张瑞文, 谷民天, 郑桂灵, 李鹏*

青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛266109

摘要: 为探讨天然放射性气体氡对植物体的生理损伤, 选择一种常见的大气污染指示植物贝可利空凤, 分别将其置于初始浓度为3 000和5 000 Bq·m⁻³的标准氡室中, 经过72 h胁迫处理后检测了植物的各种生理指标。结果表明, 叶绿素含量、过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量均与对照组有明显差异, 但MDA是唯一随氡浓度增加而显著增加的物质, 可以作为反映氡胁迫对贝可利空凤生理损伤的良好指标, 而叶绿素含量、SOD活性和CAT活性则可作为反映氡损伤的一般性指标。与之相反, 可溶性蛋白含量和相对电导率受氡影响不显著, 不适合作为氡对植物损伤的指标, 而过氧化物酶(POD)活性是否可作为合适指标还需要进一步研究。

关键词: 大气污染; 指示植物; 生理损伤; 氡

大气污染问题已经得到人们的广泛关注。除了人们所熟知的大气污染物SO₂、甲醛、PM_{2.5}等外, 一些隐蔽性较强但危害性极大的成分却易被人们所忽视, 比如导致肺癌的主要杀手——氡(²²²Rn)。氡是铀(²³⁸U)衰变链中镭(²²⁶Ra)的衰变产物, 半衰期为3.82 d。由于²²⁶Ra广泛存在于岩石、土壤等各种地质环境中, 所以氡(²²²Rn)广泛存在于大气中, 是自然界唯一的天然放射性气体(张亮等2011)。

氡对居室的污染和在人体肺部的累积, 易引致肺癌及其他癌病, 已引起世界各国政府和人们的高度重视(梁致荣等2000)。国际癌症研究机构(IARC)已将氡及其子体归为I类致癌因素, 世界卫生组织(WHO)也把氡作为19种人类致癌因子之一(童建2009)。据估计美国每年约有2.2万人因吸入氡及其短寿命子体而致肺癌, 我国估计每年约有5.5万人因同样的原因而得肺癌, 香港地区每年因氡致癌约占肺癌患者的30% (Ting 2010)。而且, 我国室内氡浓度平均值超过世界卫生组织规定的行动水平(100 Bq·m⁻³)的地区比例高达14.5% (潘自强2014)。

氡及其子体对动物体的损伤是显而易见的。苗超等(2005)发现氡及其子体可引起小鼠贫血症状, 并在较高剂量下抑制骨髓细胞的DNA合成。童建(2007)通过进行封闭空间的小鼠实验, 发现高浓度的氡暴露增加肺癌发生的危险度。而氡及其子体染毒还可造成小鼠肺组织和外周血的氧化损伤(姜自启等2016)。

但是, 氡对植物体的影响却一直未有研究。虽然植被的存在对氡及其子体的产生量存在促进作用(Jayaratne等2011), 拥有更多植被地面的氡析

出率要明显大于裸露地面(Mandija等2012)。Batlle等(2011)推测植物主要是通过表面的沉积作用吸附氡子体, 但氡对植物体是否能像对动物体一样造成损伤却一直未有报道。

在植物界中有一类不依靠土壤、可以生活在空气中的特殊类群, 被称为空气凤梨(学名*Tillandsia*, 英文名air plant)。原产美国南方及中南美洲, 但现已全世界广泛引种栽培(郑凯等2009)。它们主要是利用叶片吸收空气中的水分和养分, 因此叶片吸收能力强大, 对大气中的很多污染物具有很强的吸收效能, 成为能敏感检测环境变化的“指示植物”。早在1952年, MacIntire等(1952)首次通过松萝(*Tillandsia usneoides*)测定了雨水中氟及其氟化物的含量。后来Calasans和Malm (1997)又发现松萝能迅速和有效地积累漂浮在空中的汞离子。大气中一些常见的重金属元素如Mn、Cu、Fe、Cs、Co、N、Pb、Zn等, 一些有机污染物如多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)等, 同样可以通过利用多种空气凤梨的吸收机制进行检测(Pereira等2007)。

作为常用的大气污染指示植物, 与其他植物相比, 空气凤梨与大气中的污染物(包括氡)的关系更为紧密, 受大气污染物的影响也更为显著。正

收稿 2017-05-10 修定 2017-06-16

资助 国家自然科学基金(41475132和41571472)。

致谢 北京大学物理学院郭秋菊副教授和王云祥博士提供氡室并指导实验进行, 北京林业大学程瑾副教授在实验过程中给予帮助并提出宝贵建议。

* 通讯作者(E-mail: pengleep@163.com)。

因如此,我们选择空气凤梨中一种常见的种类贝可利空凤(*Tillandsia brachycaulos* Schltdl.),通过标准氡室对其进行不同氡浓度熏蒸处理后检测植物的生理指标变化和氧化损伤情况,以图阐明氡是否可对植物体产生显著影响,植物体受氡污染后哪些指标可反映这一影响的程度,为研究氡对生物的作用提供更多依据。

材料与amp;方法

1 材料

以贝可利空凤(*Tillandsia brachycaulos* Schltdl.)做为实验材料,贝可利空凤由空气凤梨江苏基地提供。选取30株生长健康、大小相似的贝可利空凤,将其随机分为对照组和2个实验组,每组10株。对照组置于正常环境中,实验组于1 m³氡室中进行处理。

2 方法

2.1 置氡

实验测量在北京大学物理学院辐射防护与环境保护实验室的氡室进行。氡室即开展氡相关实验研究用的腔体,是一种能用于氡测量仪刻度以及不同氡浓度和温湿度条件下各种科学实验研究的实验系统,通常由主腔室、氡源、测量系统和其他配套设备组成。

氡室的大体结构如图1所示,其容积约为1 m³,设有连接氡源的一条充氡气路,以及连接RAD7测

氡仪(美国DURRIDGE公司制造)的一条测量气路。氡室内配有小型风扇使腔室内氡浓度均匀。受氡源及氡的辐射特性影响,氡室中所能达到的最大氡浓度约为5 000 Bq·m⁻³,而且氡浓度越低、越难准确设置,会导致较大误差。因此,2个实验组初始氡浓度分别设为3 000和5 000 Bq·m⁻³。

为减少植物的自身生长状态对实验结果的影响,实验前将植株浸泡于去离子水中20 min,使其吸水饱和,后在相同条件下统一晾干30 min,以细线均匀悬挂于氡室中固定位置。调节氡室起始氡浓度至预期暴露浓度,对植物持续熏蒸72 h后测其生理指标。氡室内温度经RAD7测氡仪测定为25.8~29.5℃,湿度为5%~17%。

2.2 植物生理指标测定

参照李合生(2000)《植物生理生化实验原理和技术》,相对电导率测定采用DDS-11型电导仪进行,叶绿素含量测定采用改良的丙酮乙醇混合液法,可溶性蛋白质含量测定采用紫外分光光度法,丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑法,过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定采用紫外吸收法,过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法。

2.3 数据处理

应用Microsoft Excel 2003进行数据统计与amp;计算,用SPSS 19.0软件对数据进行方差显著性分析。

实验结果

1 不同氡浓度处理对贝可利空凤叶绿素含量的影响

实验组的叶绿素a、b和总含量比对照组都有所减少,且均与对照组贝可利空凤达到差异显著性;但随着氡浓度的升高,叶绿素a含量和总含量下降,叶绿素b含量上升(表1),且均未达到差异显著性。

2 不同氡浓度处理对贝可利空凤相对电导率的影响

随着氡浓度的增加,贝可利空凤相对电导率先升高后下降,对照组和两个试验组的相对电导率分别为48.07%、56.22%和52.90%(表2),变化程度相对较小,各组间均不存在差异显著性。

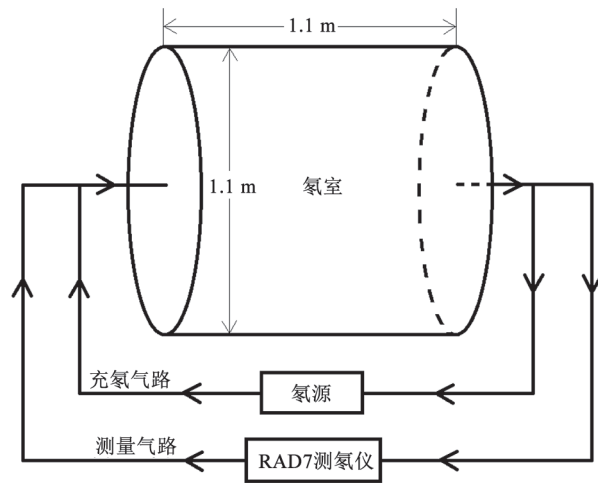


图1 氡室示意图

Fig.1 Schematic diagram of radon chamber

表1 不同氡浓度处理对贝可利空凤叶绿素含量的影响

Table 1 Effect of different radon concentrations on chlorophyll content in *Tillandsia brachycaulos*

氡浓度/Bq·m ⁻³	叶绿素a/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素b/mg·g ⁻¹ (FW)	总叶绿素/mg·g ⁻¹ (FW)
0(对照)	7.70±0.67 ^a	2.86±0.32 ^a	10.53±0.97 ^a
3 000	6.41±0.68 ^b	1.99±0.20 ^b	8.38±0.70 ^b
5 000	5.71±0.41 ^b	2.23±0.15 ^b	7.92±0.55 ^b

处理数 $n=10$ 。同列数据用不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著,表2同。

表2 不同氡浓度处理对贝可利空凤生理指标的影响

Table 2 Effect of different radon concentrations on physiological parameters in *Tillandsia brachycaulos*

氡浓度/Bq·m ⁻³	相对电导率/%	可溶性蛋白含量/ mg·g ⁻¹ (FW)	SOD活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹	CAT活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹	POD活性/ U·g ⁻¹ (FW)·min ⁻¹	MDA含量/ nmol·g ⁻¹ (FW)
0(对照)	48.07±3.71 ^a	0.31±0.03 ^a	285.75±9.45 ^b	50.15±2.06 ^a	44.17±2.88 ^a	3.93±0.17 ^c
3 000	56.22±3.80 ^a	0.23±0.03 ^{ab}	482.40±12.69 ^a	40.04±2.56 ^b	10.00±2.67 ^b	5.00±0.27 ^b
5 000	52.90±1.44 ^a	0.19±0.03 ^b	488.80±11.19 ^a	34.39±4.34 ^b	37.64±5.07 ^a	6.74±0.43 ^a

3 不同氡浓度处理对贝可利空凤可溶性蛋白含量的影响

随着氡浓度的升高,贝可利空凤的可溶性蛋白含量呈下降的趋势,对照组为(0.31±0.03) mg·g⁻¹(FW),试验组分别为(0.23±0.03)和(0.19±0.03) mg·g⁻¹(FW)(表2),与对照组相比,试验组减少了25.81%和41.94%,且当浓度增加到5 000 Bq·m⁻³时与对照组达到差异显著性。

4 不同氡浓度处理对贝可利空凤SOD活性的影响

试验组贝可利空凤的SOD活性与对照组相比存在明显差异,在氡气熏蒸后,两个不同氡浓度下分别达到(482.40±12.69)和(488.80±11.19) U·g⁻¹(FW)·min⁻¹,远大于对照组(285.75±9.45) U·g⁻¹(FW)·min⁻¹(表2),SOD活性明显增加,但两个不同氡浓度处理后的植株SOD活性间并没有显著差异。

5 不同氡浓度处理对贝可利空凤CAT活性的影响

随着氡污染浓度的升高,贝可利空凤的CAT活性逐渐降低,对照组CAT活性为(50.15±2.06) U·g⁻¹(FW)·min⁻¹,而试验组3 000和5 000 Bq·m⁻³的CAT活性分别下降到(40.04±2.56)和(34.39±4.34) U·g⁻¹(FW)·min⁻¹(表2),与对照组相比差异明显,两个试验组间差异不显著。

6 不同氡浓度处理对贝可利空凤POD活性的影响

氡处理后贝可利空凤的POD活性明显降低,当氡浓度为3 000 Bq·m⁻³时,POD活性为(10.00±2.67) U·g⁻¹(FW)·min⁻¹(表2),远小于对照组。氡浓

度5 000 Bq·m⁻³处理下POD活性没有明显降低,无显著变化。

7 不同氡浓度处理对贝可利空凤MDA含量的影响

随着氡污染浓度的升高,贝可利空凤的MDA含量逐渐增加,各组间均达到差异显著性,且高浓度5 000 Bq·m⁻³时MDA含量达到(6.74±0.43) nmol·g⁻¹(FW),远大于对照组的(3.92±0.17) nmol·g⁻¹(FW)(表2),说明在一定范围内,MDA含量与氡污染浓度存在较强相关性,浓度越高,含量越高。

讨 论

虽然之前尚无氡对植物损伤效应方面的研究,但已有一些关于氡对动物及人体组织的影响效果及机制的报道(Alavanja 2002; 童建2007; Xu等2008)。另外,氡在衰变过程中,除氡气(²²²Rn)外,还会产生一系列短寿命、粒子态的子体,如²¹⁸Po、²¹⁴Pb、²¹⁴Bi和²¹⁴Po,这些子体既具有放射性、也具有重金属的化学毒性,对生物的伤害更严重(Tempfer等2010)。因此,在一定程度上,氡对植物的损伤效应可参考氡对动物的影响及其他核素和重金属对植物的作用。

铀是自然界另一种常见的放射性核素,当小麦受到含铀溶液的胁迫时,其叶绿素含量明显降低(Jain和Aery 1997)。本研究表明,当贝可利空凤受到不同氡浓度污染时,其叶绿素含量也受到了影响,随着氡浓度的增大,叶绿素a含量和总叶绿素

含量逐渐降低(表1),说明叶绿素分子受损或合成代谢受阻,但并未表现出明显的剂量效应。综合叶绿素在氡胁迫下的变化情况,叶绿素可以作为反映氡污染对植物生理损伤的一般性指标。

铀污染下的小麦可溶性蛋白含量也上升(Jain和Aery 1997)。而本研究表明,随着氡污染浓度的增大,贝可利空风可溶性蛋白含量逐渐降低(表2),但并未与对照组产生明显差异,因此可溶性蛋白含量不适合作为植物对氡污染生理损伤的指标。

MDA和相对电导率都是反应细胞膜损伤情况的指标,我们的结果表明,在氡污染胁迫下,相对电导率有所增加,但与对照组差别并不显著(表2)。因此,相对电导率不适合作为氡污染对贝可利空风生理损伤的指标。与之相比,随着氡浓度的增大,贝可利空风MDA含量持续增大(表2),而且是各种生理指标中唯一随氡浓度增加而显著增加的物质,有剂量效应。这一变化也与姜自启等(2016)研究的氡吸入小鼠肺组织后MDA的变化趋势相同,也与其他核素对植物的影响类似。如随着铯浓度的提高,小麦幼苗中MDA含量也持续上升(安冰等2011),藻类植物中的MDA含量也随着铯含量的提高而上升(Li等2006)。因此,MDA含量能更快速地反映出贝可利空风细胞膜的损伤情况,在一定条件下,可以作为反映氡污染对植物生理损伤的良好指标。

MDA和相对电导率在氡胁迫后的不一致的复杂变化也可能与植物本身的抗氧化系统(SOD、CAT、POD等)有关。我们的试验表明,氡胁迫后,贝可利空风的SOD活性显著上升(表2),说明贝可利空风体内活性氧清除体系开始发挥作用,这在一定程度上能减轻氡对植物的伤害,增强贝可利空风对氡的抗性,同时就会导致MDA和相对电导率值出现更复杂的变化。当然,这都是基于本实验结果的推测,还需要通过研究氡对更多植物种类的影响效果来进一步证实。

但氡对动物及人体细胞的损伤效应研究表明,当给动物吸入高浓度氡时,能引起急性损害和肿瘤的发生(Xu等2008)。而氡及其子体衰变产生的 α 粒子在吸入者体内产生内照射,对DNA会造成直接损伤和间接损伤,间接损伤即刺激自由基在体内大量生成,且清除自由基的抗氧化系统被抑制,从而大量的自由基会对DNA、蛋白质等生物大分子、细胞结构和组织造成氧化损伤(Alavanja 2002)。

姜自启等(2016)的研究即发现,随着氡染毒时间增加,MDA和活性氧含量随染毒剂量升高而显著增加,SOD含量随染毒剂量升高而下降,表明其肺组织受到了氧化损伤。与之相比,虽然我们的实验没有测定活性氧的含量,但在氡胁迫下,贝可利空风体内MDA含量也显著上升(表2),表明植物组织也受到了氧化损伤。但在氡胁迫下,贝可利空风SOD活性显著升高(表2),这一现象与姜自启等(2016)研究结果不同,可能是氡胁迫诱导植物体内SOD的再合成,避免超氧阴离子自由基的大量积累,提高植物体的抗逆性。但在高浓度胁迫下,植物体的防御系统受到的损害加剧,导致SOD活性变化不明显。因此,SOD活性只适合作为反映氡污染对植物生理损伤的一般性指标。

与SOD不同,在氡胁迫下,贝可利空风CAT活性显著降低(表2),可能是氡污染胁迫导致植物体内CAT的合成受阻,由于CAT的缺失,过氧化氢的大量积累加剧膜脂过氧化而造成整体膜的伤害,产生的MDA大量积累。但随着氡浓度的增加,贝可利空风CAT的变化也未有显著的剂量效应,因此,CAT活性也可以作为反映氡污染对植物生理损伤的一般性指标。

在氡污染胁迫下,贝可利空风POD活性表现出先下降后上升的变化(表2),这与SOD和CAT的变化又不同。但植物在逆境环境中保护酶系统的各种酶是相互协调配合起作用的。有研究表明当植物体内MDA大量积累,POD会大量合成来清除MDA(王琰等2011)。综合SOD、CAT和POD的变化情况可知,在 $3\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 氡气熏蒸浓度时,贝可利空风抗氧化酶的主要任务可能是清除在胁迫阶段所积累的超氧阴离子自由基,此时SOD发挥主要作用,而更高浓度氡胁迫下POD开始发挥主要作用,使得贝可利空风尽管不可避免地受到氡及其子体的损伤,但也具有了一定的抗性。

综上,植物遭受逆境胁迫时,细胞内许多生理生化过程会发生相应的改变,不同的生理指标对逆境胁迫的反映和敏感度肯定是不同的。在氡胁迫下,贝可利空风的可溶性蛋白含量和相对电导率没有发生显著变化,这两个指标显然不适合作为氡对贝可利空风生理损伤的指标。叶绿素含量、SOD活性、CAT活性和MDA含量均与对照组有明显差异,但MDA是唯一随氡浓度增加而显著

增加的物质,对氡胁迫是最敏感的,适合作为反映氡生理损伤的良好指标,而叶绿素含量、SOD活性和CAT活性则可作为反映氡损伤的一般性指标。而POD活性的变化则较无规律,是否可作为反映氡对植物损伤的指标还需要进一步研究。当然,因现在尚无其他植物种类对氡胁迫的生理响应研究,上述结果是否可由贝可利空凤推广到整个凤梨科乃至整个植物界尚需更多数据支持。

参考文献

- Alavanja MC (2002). Biologic damage resulting from exposure to tobacco smoke and from radon: Implication for preventive interventions. *Oncogene*, 21: 7365–7375
- An B, Tang YL, Chen M, Ao J, Wang D (2011). Responses of antioxidant capacity to Cs⁺ bioconcentration in wheat. *J Nucl Agric Sci*, 25 (2): 348–352 (in Chinese with English abstract) [安冰, 唐运来, 陈梅, 敖嘉, 王丹(2011). 小麦抗氧化能力对Cs⁺富集响应的研究. *核农学报*, 25 (2): 348–352]
- Battle JVI, Smith A, Vives-Lynch S, Coplestone D, Pröhl G, Strand T (2011). Model-derived dose rates per unit concentration of radon in air in a generic plant geometry. *Radiat Environ Biophys*, 50 (4): 513–529
- Calasans CF, Malm O (1997). Elemental mercury contamination survey in chlor-alkali plant by the use of transplanted Spanish moss, *Tillandsia usneoides* (L.). *Sci Total Environ*, 208: 165–177
- Jain GS, Aery NC (1997). Effect of uranium addition on certain biochemical constituents and uranium accumulation in wheat. *Biologia*, 52: 599–604
- Jayarathne ER, Ling X, Morawska L (2011). Role of vegetation in enhancing Radon concentration and ion production in the atmosphere. *Environ Sci Technol*, 45 (15): 6350–6355
- Jiang ZQ, Liu X, Pei WW, Wang X, Tao LJ, Lu SS, Nie JH, Tong J (2016). The redon damage of lung tissue and peripheral blood in mice upon radon inhalation. *Jiangsu J Prev Med*, 27 (2): 133–135 (in Chinese with English abstract) [姜自启, 刘星, 裴炜炜, 王旭, 陶立静, 路珊珊, 聂继华, 童建(2016). 氡吸入致小鼠肺组织和外周血的氧化损伤. *江苏预防医学*, 27 (2): 133–135]
- Li HS (2000). Principles and Techniques of Plant Physiology Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press [李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社]
- Li M, Xie XT, Xue RH, Liu ZL (2006). Effects of strontium-induced stress on marine microalgae *Platymonas subcordiformis* (Chlorophyta: Volvocales). *Chin J Oceanol Limn*, 24: 154–160
- Liang ZR, Liu YY, Li LJ, Yang QQ (2000). Study of the pollution of indoor radon and its protective methods. *Suppl J Sun Yat Univ*, 20 (4): 239–243 (in Chinese with English abstract) [梁致荣, 刘彝筠, 黎烈均, 杨菁菁(2000). 居室氡污染的环境因素及防治方法研究. *中山大学学报论丛*, 20 (4): 239–243]
- MacIntire WH, Hardin W, Hester W (1952). Measurement of atmospheric fluorine analysis of rain waters and Spanish moss exposures. *Ind Eng Chem*, 44 (6): 1365–1370
- Mandija F, Rakaj M (2012). Influence of vegetation on radon exhalation rate on forests areas. In: EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, Austria, 2012. 14: 776
- Miao C, Zhong HG, Sun J, Nie JH, Su SB, Tong J (2005). Effect of inhaled Radon and its progeny on blood and bone marrow cells in mice. *Chin J Hemorheol*, 15 (2): 173–174 (in Chinese with English abstract) [苗超, 仲恒高, 孙静, 聂继华, 苏世标, 童建(2005). 氡及其子体对小鼠血液和骨髓细胞的影响. *中国血液流变学杂志*, 15 (2): 173–174]
- Pan ZQ (2014). Attaches great importance to the rise of natural radiation level by human activity. *Chin J Radiol Med Prot*, 34 (5): 321–322 (in Chinese) [潘自强(2014). 高度重视人为活动引起的天然辐射水平升高. *中华放射医学与防护杂志*, 34 (5): 321–322]
- Pereira MS, Heitmann D, Reifenhäuser W, Meire RO, Santos LS, Torres JPM, Malm O, Korner W (2007). Persistent organic pollutants in atmospheric deposition and biomonitoring with *Tillandsia usneoides* (L.) in an industrialized area in Rio de Janeiro state, south east Brazil-Part II: PCB and PAH. *Chemosphere*, 67: 1736–1745
- Tempfer H, Hofmann W, Schober A, Lettner H, Dinu AL (2010). Deposition of radon progeny on skin surfaces and resulting radiation doses in radon therapy. *Radiat Environ Biophys*, 49: 249–259
- Ting DS (2010). WHO handbook on indoor Radon: a public health perspective. *Int J Environ Stud*, 67 (1): 100–102
- Tong J (2007). Lung cancer induced by smoking and Radon exposure: discrepancy in biology and epidemiology. *J Environ Occup Med*, 24 (5): 542–545 (in Chinese with English abstract) [童建(2007). 吸烟与氡暴露致肺癌的流行病学和生物学差异. *环境与职业医学*, 24 (5): 542–545]
- Tong J (2009). Radon induced lung cancer: biological effect and protection. *Radiat Prot Bull*, 29 (5): 7–11 (in Chinese with English abstract) [童建(2009). 氡致肺癌: 生物学效应与防护. *辐射防护通讯*, 29 (5): 7–11]
- Wang Y, Chen JW, Di XY (2011). A comparative study on the SOD, POD, MDA and dissoluble protein of six provenances of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr) under water stress. *Ecol Environ Sci*, 20 (10): 1449–1453 (in Chinese with English abstract) [王琰, 陈建文, 狄晓艳(2011). 水分胁迫下不同油松种源SOD、POD、MDA及可溶性蛋白比较研究. *生态环境学报*, 20 (10): 1449–1453]
- Xu NY, Zhang SP, Nie JH, Li JX, Tong J (2008). Radon-induced proteomic profile of lung tissue in rats. *J Toxicol Environ Health A*, 71 (6): 361–366
- Zhang L, Xu TT, Guo QJ (2011). Comparison of closed chamber methods for accurate measurements of Radon exhalation rates from building materials. *Radiat Prot*, 31 (1): 17–22 (in Chinese with English abstract) [张亮, 徐婷婷, 郭秋菊(2011). 青岛地区室外氡浓度变化规律研究. *辐射防护*, 31 (1): 17–22]
- Zheng K, Ding JL, Yu LS (2009). Briefly analyzed characteristic and research progress of *Tillandsia*. *Chin Agr Sci Bull*, 25 (23): 339–342 (in Chinese with English abstract) [郑凯, 丁久玲, 俞禄生(2009). 浅析空气凤梨的特征及其研究进展. *中国农学通报*, 25 (23): 339–342]

Physiological damage of radioactive gas radon on the plants: in the case of *Tillandsia brachycaulos*

ZHANG Rui-Wen, GU Min-Tian, ZHENG Gui-Ling, LI Peng*

School of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong, 266109, China

Abstract: In order to investigate the physiological damage of radioactive gas radon on the plants, *Tillandsia brachycaulos*, one common air pollution indicator plant, was selected as the materials. Different physiological parameters were tested after the plants were treated with different radon concentrations (3 000 and 5 000 Bq·m⁻³) in the standard radon chamber for 72 h. The chlorophyll content, SOD activity, CAT activity and MDA content were significantly different from the control, but only MDA content increased significantly with radon concentrations. So, MDA content can be used as a good index reflecting the damage of radon on the plants, while chlorophyll content, SOD activity and CAT activity used as general index. In contrast, the soluble protein content and relative electrical conductivity were not significantly affected by radon, so they were not suitable as index showing the physiological damage exposed to radon, while the activity of POD as a reflection of radon on plant damage need further study.

Key words: air pollution; indicator plant; physiological damage; radon

Received 2017-05-10 Accepted 2017-06-16

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41475132 and 41571472).

*Corresponding author (E-mail: pengleep@163.com).