

松萝对天然放射性气体氡的抗性研究

谷民天 张瑞文 李鹏 郑桂灵

(青岛农业大学资源与环境学院 青岛 266000)

摘要 通过标准氡室对松萝进行不同氡浓度熏蒸处理之后,检测其植物体的各种生理指标变化。结果表明,在2 000 Bq/m³浓度的氡胁迫下,松萝相对电导率变化与对照组相比并不显著,在4 000 Bq/m³的高浓度氡胁迫下,电导率才显著升高。而不管氡浓度如何,松萝可溶性蛋白含量和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量均与对照组差异不显著。说明松萝在氡胁迫下没有表现出明显的生理损伤特征,暗示其对氡具有较强的抗性,这可能是与其叶表存在鳞片有关。另外,松萝的过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性随着氡浓度的上升有所降低,但超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性却随着氡浓度的上升而显著升高,说明在氡胁迫下,松萝体内活性氧清除体系开始发挥作用,能够进一步减轻氡对植物的伤害。

关键词 松萝, 大气污染, 氧化损伤, 辐射

中图分类号 TL71, Q948.119

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.050501

Resistance of *Tillandsia usneoides* to natural radioactive radon gas

GU Mintian ZHANG Ruiwen LI Peng ZHENG Guiling

(College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266000, China)

ABSTRACT Physiological changes to *Tillandsia usneoides* were tested after fumigation with different concentrations of radon in a standard radon chamber. The results showed that the leaf relative electrical conductivity increased at concentration of 2 000 Bq/m³, though not significantly different from that of the control group, which increased remarkably at concentration of 4 000 Bq/m³. Moreover, soluble proteins and malondialdehyde contents didn't change much with increasing radon concentrations, i.e., no significant physiological damage induced, indicating that *Tillandsia usneoides* was relatively strongly resistant to radon, which was probably related to the existence of foliar trichomes on the leaf surface. In addition, superoxide dismutase content increased greatly with increasing radon concentrations, suggesting scavenging system of reactive oxygen species played a role in reducing the damage of plants exposed to radon.

KEYWORDS *Tillandsia usneoides*, Air pollution, Oxidative stress, Radiation

CLC TL71, Q948.119

基金项目: 国家自然科学基金(41475132)

第一作者: 谷民天, 男, 1993年10月出生, 2016年6月于盐城师范学院所获理学学士学位, 目前于青岛农业大学资源与环境学院攻读硕士学位, 从事环境保护研究, E-mail: gumintian@163.com

通讯作者: 郑桂灵, 博士, 副教授, E-mail: zglibcas@aliyun.com

收稿日期: 初稿 2017-6-14; 修回 2017-9-15

Supported by National Nature Science Found (41475132)

First Author: GU Mintian (male) was born in October 1993. He received his Bachelor of Science degree from Yancheng Teachers University in June 2016. Now he is a candidate in College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, majoring in environment protection. E-mail: gumintian@163.com

Corresponding author: Ph.D. ZHENG Guiling, associate professor, E-mail: zglibcas@aliyun.com

Received 14 June 2017; accepted 15 September 2017

随着生活水平的提高,人们越来越关注室内空气污染问题。除了甲醛、CO、苯系物、PM₁₀、PM_{2.5}等常见污染物之外,还有一些污染物我们对其了解得并不深入,但是它们却严重危害我们的身体健康,比如放射性物质——氡(²²²Rn)。国际癌症研究机构已将氡列为引起肺癌的重要原因,而美国环保局则已将氡视为最危险的致癌因素^[1]。

氡是一种天然放射性惰性气体,广泛存在于室内外各个空间。氡气本身不经呼吸很难进入人体内,且在体内停留时间短,对人类健康没有很大危害。但是,氡衰变产生的各种子体很容易和空气中的颗粒物结合在一起而变成结合态氡子体。它们被人体吸入后,衰变过程中产生的 α 粒子会造成体内辐射,使得身体组织(主要是肺器官)发生电离化,并引发细胞染色体畸变,从而最终导致癌症^[2]。

关于氡及其子体对于动物体损伤方面的研究已有很多报道。刘星等^[3]研究发现,随着氡染毒时间的延长,人支气管上皮细胞中的丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量明显上升,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活力明显下降,出现了明显的毒性效应。染氡组小鼠肺组织和外周血中的SOD活性均降低,MDA含量均升高,也表明氡及其子体染毒可造成小鼠肺组织和外周血的氧化损伤^[4]。虽然Batlle等^[5]推测植物可通过表面的沉积作用吸附氡子体,植被的存在也能促进氡析出率^[6-7]。但是,氡是否会对植物产生类似的损伤?而植物是否会对氡及其子体产生抗性?植物对氡胁迫的耐受能力又是怎样?这些问题一直未见报道。

松萝(*Tillandsia usneoides*)隶属于凤梨科、铁兰属,是多年生附生植物,虽有根、但根部不起吸收作用,可不需要土壤而在空气中生长,被称之为“空气凤梨”。因此,其叶片具有很强的从空气中吸收水分和养分的能力,也可同时吸收大气中的各种重金属、有机污染物等物质,除观赏外,一直被用来作为监测环境变化的“指示植物”^[8-14]。作为常用的大气污染指示植物,与其它植物相比,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可能更为显著。因此,我们选择松萝做为实验材料,通过标准氡室对其进行不同氡浓度熏蒸处理后,探究氡对松萝的影响及松萝对氡的抗性。

1 材料与方法

1.1 材料

松萝做为实验材料,称取3丛生长健康的松萝,每丛200 g,将其分为对照组和两个实验组。对照组置于正常环境中,实验组置于1 m³氡室中进行处理,初始暴露浓度分别约为2 000 Bq/m³和4 000 Bq/m³。受氡源影响,氡室中所能达到的最大氡浓度约为5 000 Bq/m³,而且氡浓度越低、越难准确设置,会导致较大误差。因此,两个实验组初始氡浓度分别设为4 000 Bq/m³和2 000 Bq/m³。

1.2 方法

1.2.1 置氡

置氡实验在北京大学物理学院辐射防护与环境保护实验室的标准氡室进行。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条件下各种科学研究的实验系统,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气气路,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。实验前将松萝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后观察其形态变化并测定其生理指标。

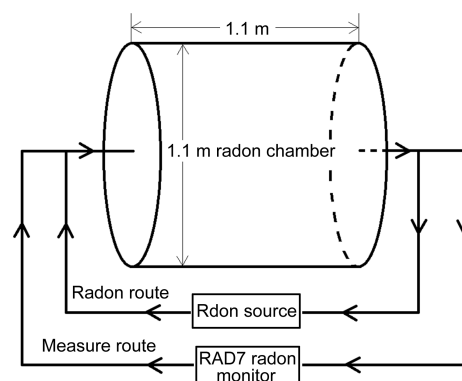


图1 氡室示意图

Fig.1 Schematic diagram of radon chamber

1.2.2 相对电导率测量

随机截取一定长度的松萝,先用超纯水冲洗三四遍,用滤纸吸干叶表面水分,再用剪刀各剪出1 cm的截段15个,放入50 mL三角瓶中,加入20 mL

超纯水, 静置 2 h, 用 DDS-11 型电导仪测定电导值 C_{a1} ; 将测定后的样品在 100 °C 中水浴 20 min, 冷却至室温, 测定电导值 C_{a2} 。

$$\text{相对电导率}(\%) = C_{a1} / C_{a2} \times 100\%$$

1.2.3 叶绿素测量

称取 0.2 g 松萝, 用剪刀剪成约 1 mm 宽的细丝, 无损的放入事先准备好的具塞三角瓶中。加入丙酮和乙醇各 10 mL, 室温下暗处提取。4 h 后使用分光光度计在波长 645、663 nm 下分别测定空气凤梨叶片光密度值。

$$\text{叶绿素 a 浓度} = 12.72 A_{663} - 2.59 A_{645}$$

$$\text{叶绿素 b 浓度} = 22.88 A_{645} - 4.67 A_{663}$$

$$\text{总叶绿素浓度} = 20.20 A_{645} + 8.05 A_{663}$$

1.2.4 可溶性蛋白质的含量测定

称取植物样 0.5 g, 用 5 mL 缓冲液研磨成匀浆后, 在 10 000 r/min 的条件下离心 10 min, 取 1.0 mL 样品提取液(上清液), 根据蛋白质浓度, 用 0.1 mol/L pH=7.0 磷酸缓冲液稀释 10 倍后, 以 pH=7.0 磷酸缓冲液为空白调零, 用紫外分光光度计分别在 280 nm 和 260 nm 波长下测其吸光度。

$$\text{可溶性蛋白含量}(\%)$$

$$= (1.45 A_{280} - 0.74 A_{260}) \times n / \text{样品重} \times 100\%。$$

式中: 1.45 和 0.74 为校正值; A_{280} 和 A_{260} 为溶液在 280 nm 和 260 nm 时的吸光度; n 为稀释倍数。

1.2.5 超氧化物歧化酶(SOD)活力的测定

称取植物样 0.5 g 于预冷研钵中, 加 pH=7.8 的磷酸缓冲液, 磨成匀浆, 加缓冲液使其终体积为 10 mL。取 5 mL 于 4 °C 下 4 000 r/min 离心 15 min, 上清液即为 SOD 粗提液。取 25 mL 玻璃管 7 支, 2 支为对照管, 分别加入: 3 mL 0.05 mol/L pH=7.8 磷酸缓冲液、0.6 mL 130 mmol/L 甲硫氨酸溶液(MET)、0.6 mL 750 $\mu\text{mol/L}$ NBT 溶液、0.6 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ EDTA 溶液、0.6 mL 20 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素、0.2 mL 酶液(对照以蒸馏水代替)、1.0 mL 蒸馏水。混匀后将 1 支对照管置于暗处, 其他各管于 4 000 Lx 日光下 20 min。用紫外分光光度计在 560 nm 下测定各管的吸光度, 利用固定公式计算 SOD 活性。

1.2.6 过氧化氢酶(CAT)活力的测定

称取植物样 1 g, 剪碎后置入研钵, 加 4 °C 预冷的 0.2 mol/L pH=7.8 的磷酸缓冲液(内含 1% 聚乙烯吡咯烷酮)研磨, 匀浆用 25 mL 容量瓶定容。后放入 4 °C 冰箱静置 10 min, 将上层清液移入离心管, 在 4 000 r/min 离心条件下离心 15 min, 上清液即为

CAT 的粗体液。4 °C 冰箱中保存备用。取 10 mL 试管 6 支, 其中 1 支为对照管, 5 支为实验管, 按顺序加入各试剂: 0.2 mL 粗酶液(对照以是蒸馏水代替)、1.5 mL pH=7.8 磷酸缓冲液和 1.0 mL 蒸馏水。对照管在沸水中煮 1 min 杀死酶液。其他试管在 25 °C 下预热, 逐管加入 0.1 mol/L H_2O_2 0.3 mL, 迅速倒入石英杯中, 在 240 nm 下测定吸光度(用蒸馏水调零), 每间隔 30 s 读一次, 共测 3 min, 待 3 支管全部测定完后, 计算酶的活性。

1.2.7 CAT 活性

$$[U/(g \cdot \text{min}) W_F] = \Delta A_{240} \times V_T / (0.1 \times V_S \times W_F \times t)$$

$$\Delta A_{240} = A_{S0} - (A_{S1} + A_{S2} + A_{S3}) / 3$$

式中: A_{S0} 为加入经过失活处理的酶液的对照管吸光值; A_{S1} 、 A_{S2} 、 A_{S3} 为吸光值; V_T 为酶液总量(mL); V_S 为反应时所用酶液量(mL); W_F 为样品鲜重(g); t 为从加 H_2O_2 开始到最后 1 次读数的时间(min); 0.1 为 A_{240} 下降 0.1 时的 1 个酶活力单位。

1.2.8 MDA 含量的测定

称取植物样 1 g, 加入 10% 三氯乙酸(TCA)和石英砂, 研磨至匀浆。4 000 r/min 离心 10 min, 吸取离心的上清液 2 mL, 加入 2 mL 0.6% 硫代比妥酸(TBA), 沸水浴上反应 15 min, 冷却后离心, 在 450、532 和 600 nm 波长处测定其吸光度。

$$\text{MDA 浓度}(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 A_{450}$$

$$\text{MDA 含量}(\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} W_F)$$

$$= \text{MDA 浓度}(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) \times V / (W_F \times 1000)$$

式中: V 为提取液体积(mL); W_F 为样品鲜重(g)。

1.2.9 数据处理

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

2 结果与分析

2.1 相对电导率

当植物遭受逆境胁迫时, 电导率值发生改变, 通过测定外渗液电导率的变化, 可知对质膜的伤害程度和所测材料抗逆性的大小。松萝对照组和两个实验组的相对电导率分别为 48.91%、59.42% 和 67.85%。在氡胁迫下, 相对电导率随着氡浓度增加而增大(图 2), 2 000 Bq/m^3 氡浓度胁迫后的松萝相对电导率与对照相比没有显著性差异(单因素方差分析, $p > 0.05$), 直到浓度上升到 4 000 Bq/m^3 时, 才发生显著性变化(单因素方差分析, $p < 0.05$)。

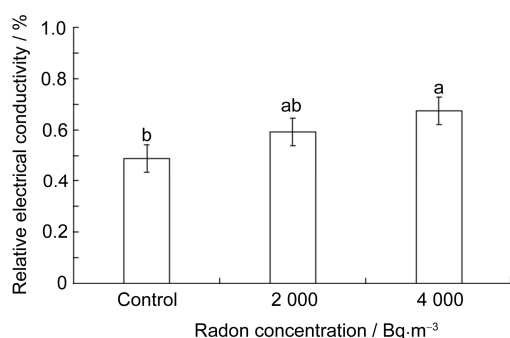


图2 不同氡浓度下松萝的相对电导率
Fig.2 Relative electrical conductivity of *Tillandsia usneoides* at different radon concentrations

2.2 叶绿素含量

当植物在逆境中受到伤害,最明显的一个变化就是叶绿素分子受损或合成代谢受阻,使其含量下降。但通过实验发现,随着氡浓度的升高,松萝的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量先升高、再降低(表 1)。2 000 Bq/m³ 和 4 000 Bq/m³ 氡浓度下的总叶绿素含量分别与对照组呈现出显著性差异(单因素方差分析, $p < 0.05$)。

表 1 不同氡浓度胁迫下松萝叶绿素含量
Table 1 Chlorophyll content of *Tillandsia usneoides* under different radon concentration stress

氡浓度 / Bq·m ⁻³	叶绿素 a / mg·g ⁻¹	叶绿素 b / mg·g ⁻¹	总叶绿素 / mg·g ⁻¹
Radon con- centrations	Chlorophyll a	Chlorophyll b	To- tal-Chlorophyll
0	4.43±0.28 ^{ab}	1.86±0.21 ^a	6.28±0.34 ^b
2 000	5.39±0.68 ^a	2.36±0.28 ^a	7.74±0.64 ^c
4 000	3.35±0.24 ^b	0.64±0.20 ^b	3.98±0.31 ^a

注:不同小写字母表示不同处理之间有显著差异($p < 0.05$)。
Notes: different small letters mean significant difference among different treatments ($p < 0.05$).

2.3 可溶性蛋白含量

随着氡浓度的升高,松萝的可溶性蛋白含量也呈现先上升后呈下降的趋势(图 3),但是对照组与实验组相比,并未达到差异显著性(单因素方差分析, $p > 0.05$)。

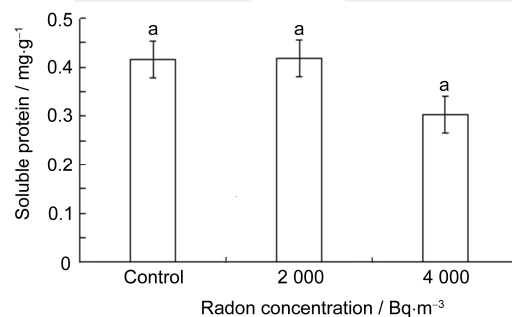


图3 不同氡浓度胁迫下松萝的可溶性蛋白含量
Fig.3 Soluble protein of *Tillandsia usneoides* under different radon concentration stress

2.4 超氧化物歧化酶(SOD)活性

随着氡浓度的上升,松萝对照组 SOD 活性与在 2 000 Bq/m³ 氡浓度下的活性相比,由(177.00±4.98) U/(g·min) 上升到(451.20±5.86) U/(g·min)。而在 4 000 Bq/m³ 氡浓度下, SOD 活性相比 2 000 Bq/m³ 氡浓度又有小幅度下降,达到(420.60±9.06) U/(g·min) (图 4)。两种氡浓度下松萝的 SOD 活性与对照组相比,均达到差异显著性(单因素方差分析, $p < 0.05$),但两个不同氡浓度处理后的松萝间 SOD 值并没有显著差异(单因素方差分析, $p > 0.05$)。

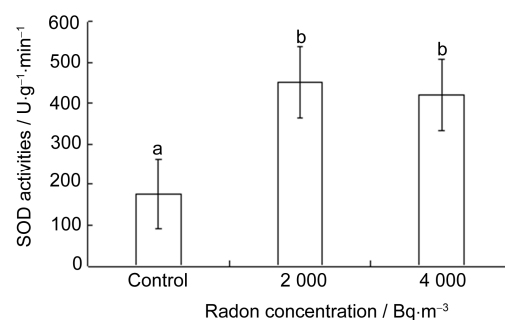


图4 不同氡浓度胁迫松萝的 SOD 活性
Fig.4 SOD activities of *Tillandsia usneoides* under different radon concentrations stress

2.5 过氧化氢酶(CAT)活性

随着氡浓度的升高,松萝的 CAT 活性降低(图 5)。对照组 CAT 活性为 31.111 U/(g·min),在 2 000 Bq/m³ 氡浓度下, CAT 活性下降到了 22.986 U/(g·min)。4 000 Bq/m³ 氡浓度下, CAT 活性略有上升,达到了 23.153 U/(g·min)。但三组之间均未达到差异显著性(单因素方差分析, $p > 0.05$)。

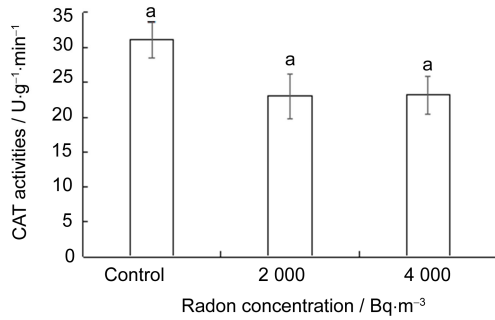


图5 不同氡浓度胁迫下松萝的CAT活性
Fig.5 CAT activities of *Tillandsia usneoides* under different radon concentrations stress

2.6 MDA 含量

随着氡浓度的升高,松萝的MDA含量先降低再升高(表2),对照组MDA含量为(5.24±0.48) nmol/g,在2 000 Bq/m³氡浓度下,MDA含量降低到(4.26±0.26) nmol/g,在4 000 Bq/m³氡浓度下,MDA含量又上升到(8.86±3.18) nmol/g,但3组之间均未达到差异显著性(单因素方差分析, $p>0.05$)。

表2 不同氡浓度胁迫下松萝MDA含量
Table 2 MDA content of *Tillandsia usneoides* under different radon concentration stress

氡浓度 / Bq·m ⁻³ Radon concentration	MDA / nmol·g ⁻¹
0	5.24±0.48 ^a
2 000	4.26±0.26 ^a
4 000	8.86±3.18 ^a

注:不同小写字母表示不同处理之间有显著差异($p<0.05$)。
Note: Different small letters mean significant difference among different treatments ($p<0.05$).

3 讨论

3.1 氡气对松萝的影响

植物对各种逆境胁迫都有一定的抵抗能力,但超过其承受范围,植物体内生理特性会发生改变,这些改变最终会通过植物受损或者生长受抑制表现出来。逆境胁迫对细胞的影响首先会作用于细胞膜,因此,膜透性可以作为植物对各种污染物反应的指标^[15],而电导率和MDA都是反映细胞膜透性和过氧化程度的重要指标^[16-17]。另外,在逆境胁迫下,细胞还会加快可溶性蛋白质的积累,以调节细胞内的渗透势,保护细胞内重要酶类的活性^[18]。

本实验发现,在不同浓度的氡胁迫下,松萝可溶性蛋白含量有一定程度的下降,MDA的含量随着氡浓度升高先降低后升高,但均与对照组差异不

显著(表2、图3)。在氡胁迫下,松萝相对电导率均有所增加。但是,在2 000 Bq/m³浓度的氡胁迫下,电导率变化与对照组相比并不显著,在4 000 Bq/m³浓度的氡胁迫下,电导率才与对照组发生了显著变化(图1)。考虑到中国室内氡的浓度限值为400 Bq/m³,大部分省份的平均氡浓度不超过50 Bq/m³^[19]。而此处我们对松萝施以明显高浓度的氡,但只有达到4 000 Bq/m³左右的浓度时,仅导致松萝的相对电导率发生了显著变化,表明松萝对氡有较强的抗性。

3.2 松萝对氡具有较强抗性的原因探讨

生物指示物根据其监测特点分为3类:敏感型、生物损伤型及积累型^[20]。做为常用的积累型指示植物,一个基本条件是必须具备的,即对污染物具有很强的抗性,不会受污染后很快致死^[21]。松萝是空气凤梨类群中最早被发现可以作为积累型指示植物的物种,已被广泛应用于Hg、Cu、Fe、Ni、Mn、Pb、V、Cs、Sr、Zn、PCB(多氯联苯)、PAH(多环芳烃)等多种大气重金属、核素和有机污染物的监测,其对各种污染物的较强抗性广为人知^[8-10]。虽然氡是一种放射性气体,但其对生物体的影响除气体状的²²²Rn外,主要是其各种粒子态的子体,如²¹⁸Po、²¹⁰Pb、²¹⁰Bi、²¹⁰Po等,它们均主要以类似重金属的形式存在。因此,松萝对氡也具有较强

的抗性是不难理解的。

松萝对氡具有较强的抗性是与其独特的生物学特征息息相关的。其叶片表面覆盖有厚厚的鳞片,利用显微技术对松萝吸收Hg、Pb、Cs、Sr等重金属粒子的研究表明,绝大部分重金属颗粒被叶表鳞片所吸附^[22]。也就是说,鳞片做为叶片最外层的保护结构,有效防止了污染物进入植物体内对植物产生伤害。即使有少部分能进入植物内部,SOD、CAT等抗氧化酶系统的存在也能进一步减轻氡对植物的伤害。SOD和CAT等抗氧化酶是植物活性氧自由基清除剂,当植物受到逆境胁迫时,这些保护酶的活性会增强,从而可以有效清除体内的自由基,使膜系统减轻因自由基而引发的过氧化作用伤害,保持膜结构及功能的稳定性^[23-24]。实验表明,松萝的CAT活性随着氡浓度的上升有所降低(图5),但SOD活性却随着氡浓度的上升而显著升高(图4),说明在氡胁迫下,松萝体内活性氧清除体系开始发挥作用,能够进一步增加松萝对氡的抗性。

参考文献

- 朴春南, 田梅, 刘建香, 等. p53 与氡及其子体诱发肺癌关系的研究进展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2008, **28**(6): 586-588. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2008.06.011.
PIAO Chunnan, TIAN Mei, LIU Jianxiang, *et al.* Advances in the relationship between p53 and lung cancer induced by radon and its daughters[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2008, **28**(6): 586-588. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2008.06.011.
- 郭志英, 田梅, 苏旭. 氡及其子体生物学效应研究进展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2009, **29**(2): 242-245. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2009.02.046.
GUO Zhiying, TIAN Mei, SU Xu. Advances in research on biological effects of radon and its daughters[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2009, **29**(2): 242-245. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2009.02.046.
- 刘星, 聂继华, 陈志海, 等. 氡对 HBE 细胞氧化损伤的研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2013, **31**(2): 19-22.
LIU Xing, NIE Jihua, CHEN Zhihai, *et al.* Oxidative damage of human bronchial epithelial cells induced by radon exposure[J]. Journal of Radiation Research & Radiation Processing, 2013, **31**(2): 19-22.
- 姜自启, 刘星, 裴炜炜, 等. 氡吸入致小鼠肺组织和外周血的氧化损伤[J]. 江苏预防医学, 2016, **27**(2): 133-135. DOI:10.13668/j.issn.1006-9070.2016.02.002.
JIANG Ziqi, LIU Xing, PEI Weiwei, *et al.* The redox damage of lung tissue and peripheral blood in mice upon radon inhalation[J]. Jiangsu Journal of Preventive Medicine, 2016, **27**(2): 133-135. DOI: 10.13668/j.issn.1006-9070.2016.02.002.
- Vives i B J, Smith A, Vives-Lynch S, *et al.* Model-derived dose rates per unit concentration of radon in air in a generic plant geometry[J]. Radiation & Environmental Biophysics, 2011, **50**(4):513-529.
- Jayaratne E R, Ling X, Morawska L. Role of vegetation in enhancing radon concentration and ion production in the atmosphere[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(15):6350.
- Mandija F, Rakaj M. Influence of vegetation on radon exhalation rate on forests areas[C]//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012: 776.
- Figueiredo A M, Nogueira C A, Saiki M, *et al.* Assessment of atmospheric metallic pollution in the metropolitan region of São Paulo, Brazil, employing *Tillandsia usneoides* L. as biomonitor[J]. Environmental Pollution, 2007, **145**(1): 279-292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.010>.
- Markert B. Determination of trace elements in *Tillandsia usneoides* by neutron activation analysis for environmental biomonitoring[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2001, **249**(2): 391-395. DOI: 0236-5731/2001/USD 17.00.
- Figueiredo A M G, Alcalá A L, Ticianelli R B, *et al.* The use of *Tillandsia usneoides*, L. as bioindicator of air pollution in São Paulo, Brazil[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2004, **259**(1): 59-63. DOI: 10.1023/B:JRNC.0000015806.15495.89.
- Wannaz E D, Pignata M L. Calibration of four species of *Tillandsia*, as air pollution biomonitors[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2006, **53**(3): 185-209. DOI: 10.1007/s10874-005-9006-6.
- Schrimpf E. Air pollution patterns in two cities of Colombia, S. A. According to trace substances content of an epiphyte (*Tillandsia recurvata* L.)[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1984, **21**(1): 279-315. DOI: 10.1007/BF00163631.
- Brighigna L, Ravanelli M, Minelli A, *et al.* The use of an epiphyte (*Tillandsia caput-medusae morren*) as bioindicator of air pollution in Costa Rica[J]. Science of the Total Environment, 1997, **198**(2): 175-180. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05447-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05447-8).
- Nyman L P, Davis J P, O'Dell S J, *et al.* Active uptake of amino acids by leaves of an epiphytic vascular plant, *Tillandsia paucifolia* (Bromeliaceae)[J]. Plant Physiology, 1987, **83**(3): 681-4. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.83.3.681>.
- 李朝周, 梁恕坤, 焦健, 等. 逆境胁迫下多胺与乙烯代谢的相关性及其对细胞膜保护系统影响的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2002, **37**(3): 265-271. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4315.2002.03.001.
LI Chaozhou, LIANG Sukun, JIAO Jian, *et al.* Review on the relationship between ethylene and polyamines metabolism and its influence on cell membrane protection system[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2002, **37**(3): 265-271. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4315.2002.03.001.
- 谢田, 徐中际. 测定细胞膜透性的紫外吸收法[J]. 植物生理学报, 1986(1): 47-48. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.

- 1986.01.021.
- XIE Tian, XU Zhongji. Ultraviolet absorption method for determination of cell membrane permeability[J]. Plant Physiology Communications, 1986(1): 47-48. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.1986.01.021.
- 17 陈贵, 胡文玉, 谢甫绶,等. 提取植物体内 MDA 的溶剂及 MDA 作为衰老指标的探讨[J]. 植物生理学报, 1991(1): 44-46. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.1991.01.020.
- CHEN Gui, HU Wenyu, XIE Pudi, *et al.* Solvent for extracting malondialdehyde in plant as an index of senescence[J]. Plant Physiology Communications, 1991(1): 44-46. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.1991.01.020.
- 18 李西, 王丽华, 刘尉, 等. 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较[J]. 生态学报, 2014, **205**(5): 1189-1197. DOI: 10.5846/stxb201210191454.
- LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, *et al.* Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **205**(5): 1189-1197. DOI: 10.5846/stxb201210191454.
- 19 任天山. 室内氡的来源、水平和控制[J]. 辐射防护, 2001, **21**(5): 291-299. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2001.05.005.
- REN Tianshan. Source, level and control of indoor radon [J]. Radialization Protection, 2001, **21**(5): 291-299. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2001.05.005.
- 20 Markert B, 王美娥, Wünschmann S, 等. 环境质量评价中的生物指示与生物监测[J]. 生态学报, 2013, **33**(1): 33-44. DOI: 10.5846/stxb201106300977.
- Markert B, WANG Meie, Wünschmann S, *et al.* Bioindicators and biomonitors in environmental quality assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(1): 33-44. DOI: 10.5846/stxb201106300977.
- 21 王玲. 12 种常用乔木对大气污染物的吸收净化效益及抗性生理研究[D]. 西南大学, 2015.
- WANG Ling. Research on absorption and physiological resistance of twelve common trees to air pollutants[D]. Southwest University, 2015.
- 22 李俊霖, 李鹏, 王恒蓉,等. 特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(4): 1451-1458.
- LI Junlin, LI Peng, WANG Hengrong, *et al.* Purification of air pollutant—formaldehyde with special plant group-epiphytic *Tillandsia*[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(4): 1451-1458.
- 23 陈银萍. 圆柏属植物抗冷冻适应性机制研究[D]. 兰州大学, 2006.
- CHEN Yinping. Studies on adaptive mechanisms of plants of Sabina to freezing stress[D]. Lanzhou University, 2006.
- 24 鲁敏, 赵学明, 赵洁, 等. 室内苯污染胁迫下植物抗性的研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2013, **28**(5): 457-463.
- LU Min, ZHAO Xueming, ZHAO Jie, *et al.* Research progress of plant resistance for indoor benzene pollution stress[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, **28**(5): 457- 463.

更正声明

《辐射研究与辐射工艺学报》2015 年 33 卷第 3 期论文, 重离子治疗肿瘤中 RBE 的影响因素及计算方法中, 公式 (4), $N(D)=\ln S(D)$ 更正为: $N(D)=-\ln S(D)$; 公式 (7), $v(D)=N(D)/V-\ln S(D)/V$ 更正为: $v(D)=N(D)/V=-\ln S(D)/V$ 。