

地下工程中空气离子环境和氡害

田志谦 冯日端 袁代光

(总参工程兵第四设计科研所)

近年来国内外大量研究资料表明:环境中空气离子和氡是两个与人舒适感及人体健康密切相关的环境因素。地下工程中空气离子和氡问题比地面室内环境更为突出。随着地下空间广为开发利用,如何改善地下工程中空气离子环境及防氡害问题正在引起人们的极大关注。我们对我国五个地区的 37 个地下工程进行了 3 年多的测试及试验研究,获得实测数据 25000 多个,现将研究结果简介如下。

一、研究方法和仪器

研究方法 面上的工程抽样测试,点上的工程深入系统的试验研究方法。面上工程分布在长沙、武汉、北京、沈阳和大连五个地区,共 37 个工程。点上工程有三个:一个坑道,两个掩土工程。工程类型包括坑道、掩土、复建工程。使用性质类型包括:指挥、通讯、旅馆、办公室、商场、礼堂和地铁等。将

分别属于空气卫生学的空气离子问题、辐射防护的氡及其子体问题和通风空调的温湿度、通风率及含尘量问题进行同时测试和研究。

主要仪器 空气离子浓度的测试采用 CNF-1 型大气离子浓度测试仪。氡及其子体浓度的测试采用 FDT-84 型和 ZYW-8501 型测试仪。含尘量的测试采用 Y06-1 型尘埃粒子计数仪,还使用了温湿度、风速、气压等常规测量仪器。

二、空气离子及氡水平概况

所测各类工程中的正离子浓度 N^+ 、负离子浓度 N^- 、单极性系数 q 、氡浓度 R_n 、氡子体浓度 R_{nd} 、平衡因子 F 、空气温度 t 和相对湿度 φ 列于表 1。由表 1 可知: (1) 各类工程的空气离子、氡及其子体浓度高低相差可达两个数量级以上,坑道高于掩土工程;未使用工程高于使用工程。经显著性差

表 1 各类地下工程空气离子、氡及其子体浓度、温湿度简况

工程类型	工程数	N^+ 个/ cm^3	N^- 个/ cm^3	q	工程数	R_n Bq/m^3	R_{nd} Bq/m^3	F	t $^{\circ}\text{C}$	φ %
使用坑道工程	7	3040	2141	1.4	5	492.6	273.1	0.56	21.8	65.5
未使用坑道工程	3	10878	9744	1.13	3	2118.1	1330.5	0.59	15.3	78.1
使用掩土工程	14	350	201	2.0	21	154.9	86.6	0.58	18.5	63.1
未使用掩土工程	4	2816	2300	1.23	4	684.7	437.3	0.64	17.0	72.5
坑道工程	10	5394	4422	1.32	8	1102.1	669.7	0.57	19.4	70.2
掩土工程	18	973	726	1.83	25	239.7	142.7	0.60	18.2	64.7
使用工程	21	1248	848	1.8	26	219.8	122.5	0.58	17.8	63.6
未使用工程	7	6271	5490	1.2	7	1299.0	820.1	0.60	16.3	74.9
地下工程	28	2673	2148	1.65	33	448.8	270.5	0.57	18.5	66.1

异检查,各类工程间存在非常显著差异($P < 0.001$)。经分布检查,空气离子浓度和氡及其子体浓度均服从对数正态分布,单极性系数和平衡因子服从正态分布。(2)使用的地下工程,特别是使用的掩土工程中空气负离子浓度算术均值为 $201 \text{ 个}/\text{cm}^3$,低于地面室内正常值。单极性系数算术均值为 2.0,远高于地面室内正常值(1.2)。使用的地下工程中氡子体浓度算术均值为 $122.5 \text{ Bq}/\text{m}^3$,比地面室内正常值约高一个数量级,平衡因子的算术均值为 0.58。(3)空气离子浓度正相关于氡及其子体浓度。

三、空气离子、氡及其子体浓度年变化规律

对某地下工程经长期观测,空气正负离子浓度、氡及其子体浓度的年变化规律如图 1 所示(温湿度年变化也一并划上)。由图 1 可知,各种浓度均为夏季高,冬季低,春秋季节居中。空气负离子浓度最高最低日均值之比约为 7—8。氡及其子体浓度最高最低日均值之比约为 6。空气离子浓度 5 月份月均值接近年均值;氡及其子体浓度 4 月份月均值接近年均值。

造成上述年变化规律的主要原因有两点:第一,夏季地下工程为了防潮,尽量控制工程外新风的进入,结果使氡及其子体在工程内积累。而在冬季,工程自然通风较好,工程内的氡及其子体一般可及时排到工程外部。第二,夏季地下水较丰富,被复的渗漏水 and 散湿量较大,地下水中的氡便随地下水扩

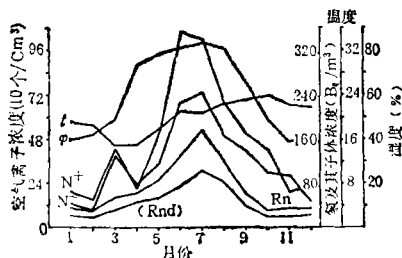


图 1 氡及其子体空气离子浓度变化

散到工程内,造成氡及其子体浓度上升。而我们知道空气离子浓度正相关于氡浓度。所以,氡浓度的升高必然导致离子浓度的升高。

四、空气离子浓度主要影响因素

地下工程中空气离子的影响因素很多,也很复杂。本课题分别试验研究了氡、含尘量、温湿度、通风空调系统、人员、建筑内装修材料、季节、工程类型及其所在地区以及通风率等因素对空气离子的影响。结果表明,前四种因素是直接的主要影响因素,其余的是间接次要影响因素。

(一) 空气离子、氡浓度及含尘量间关系

将大量测试数据经计算处理后,三者间的回归曲线如图 2 所示。回归复相关系数为 0.997,剩余标准差为 $195 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。由图 2 明显看出:空气负离子浓度正相关于氡浓度,负相关于含尘量 ($\geq 0.3 \mu$)。这与理论分析是一致的。因为氡在衰变为一系列氡子体过程中产生 α 、 β 射线,而它们均有电离空气的本领。如一个能量为 3 MeV 的 α 粒子,一般可电离出 112000 对空气离子;一个 β 粒子可

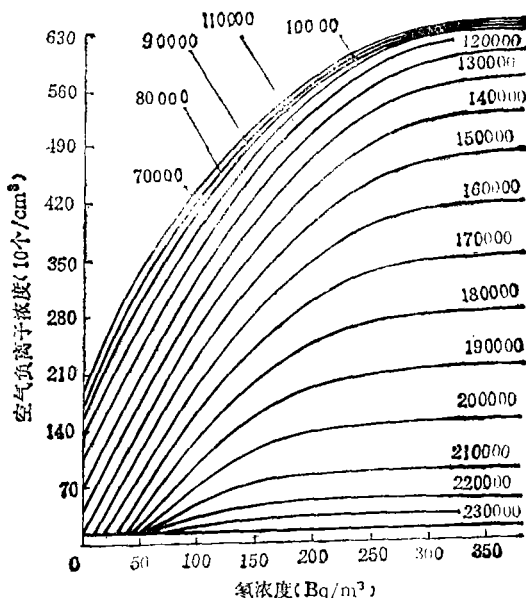


图 2 空气离子和氡浓度、含尘量的关系

电离出 40000 对。显然空气负离子应正相关于氡浓度。大气尘埃在干燥空气中, 表面最大带电量可达 1.6×10^{10} 电子/ cm^2 , 它与空气离子接触时, 可吸附大量空气离子, 使离子减少。所以二者成负相关。

(二) 温湿度对空气负离子浓度的影响

某工程在含尘量不变情况下, 相对湿度由 38% 升到 89% 时, 每单位放射性活度对应的空气负离子浓度由 5.3 个/Bq 下降到 3.7 个/Bq, 说明相对湿度增高使空气负离子浓度下降。地下工程中温度变化较小, 对离子浓度影响不大, 可忽略。

(三) 通风空调系统对空气负离子浓度的影响

试验结果表明: 空调系统各设备及管道能大量损耗空气负离子, 特别是除尘器的效率越高, 离子损耗越多。

至于其它影响因素均是由于首先影响到环境中的氡及其子体、含尘量和空气温湿度, 而间接影响到空气离子。如通风率的变化必然要影响到氡及其子体浓度, 进而影响离子浓度。

五、空气离子卫生标准^[4-7]

目前各国尚未有统一的空气离子卫生标准。美国建议住宅中负离子浓度不低于 1000 个/ cm^3 ; 苏联提出不低于 2000 个/ cm^3 ; 日本根据人一昼夜应吸入 1—3 个空气离子生物学单位, 提出应保持环境中的空气离子浓度 1000—3000 个/ cm^3 。但由于临界迁移率不统一, 各国提出的离子浓度可比性不强。离子卫生指标还包括重轻离子之比。有的提出重轻离子之比应小于 50。正负离子之比应小于 1.2 左右是各国公认的卫生指标之一。

根据上述情况, 我们认为地下工程空气负离子浓度应达到地面室内的平均水平, 即按临界迁移率为 $0.14 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 时, 负离子浓度应在 300—500 个/ cm^3 以上, 单极性系数应在 1.2 以下。

六、改善空气离子环境措施^[1-3]

通过以上试验研究可知: 氡及其子体的存在是地下工程中空气离子的主要产生因素。但环境中氡水平却应保持在一定标准以下。所以靠较高氡水平来维持较高离子浓度的措施是不可行的。我们认为, 改善地下工程空气离子环境的必然有效的措施是: 在综合考虑各种环境因素及满足放射卫生防护标准、含尘卫生标准和温湿度要求基础上, 应尽量保持环境中较低的含尘量和湿度, 以减少空气离子的消失; 同时必须适当安装空气负离子发生器, 以提高负离子浓度。

七、防 氡 通 风

(一) 地下工程氡子体导出空气浓度^[8-11]

据“放射卫生防护标准”、UNSEAR 1982 年报告、ICRP 的有关出版物及地下工程主要辐射源情况, 经分析认为地下工程人员因吸入氡子体所致年有效剂量当量限值应为 3 mSv。并经推算, 对于地下工作人员, 地下工程的氡子体导出空气浓度为 $\text{DAC} = 93 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。所测 33 个地下工程的氡子体浓度超出此值的占 64%。经剂量估算, 使用的地下工程工作人员因吸入氡子体所致年有效剂量当量平均为 3.92 mSv, 超出了限值。可见我国地下工程中氡害问题急待解决。

(二) 氡浓度 R_n 与通风率 λ_v 的关系

在目前的各种降氡方法中, 通风是地下工程较为现实、经济、有效的防氡方法。防氡的关键问题是控制氡子体浓度不超过 DAC。而氡子体浓度为 $R_{nd} = R_n \cdot F$ 。所以必须研究 R_n 和 F (平衡因子) 与通风率 λ_v 的关系。

经试验可用下式近似表示 R_n 与 λ_v 的关系 (氡析出率为常数, 认为通风时间 $t = 5/\lambda_v$ 时 R_n 基本平衡)。

$$R_{n_{eq}} = \frac{\alpha S}{V \cdot \lambda_v} + R_{n_0} + 0.0067$$

$$\times \left(Rn_1 - Rn_0 - \frac{\alpha S}{V \cdot \lambda_v} \right) \quad (1)$$

式中: Rn_{eq} 为平衡氡浓度 (Bq/m^3); α 为氡平均析出率 ($Bq/m^3 \cdot s$); Rn_0 为进风氡浓度 (Bq/m^3); Rn_1 为通风初始氡浓度 (Bq/m^3); λ_v 为通风率 ($1/h$); S/V 为房间表面积与体积之比 ($1/m$).

经 9 种 λ_v 的试验,理论计算与实测值符合较好. 如当 $\lambda_v = 0.61/h$ 时, Rn 与 t 关系的回归方程为: $Rn = 25.7 + 121e^{-0.61t}$. 相关系数为 $r = 0.987$. 实测点与理论计算曲线如图 3 所示.

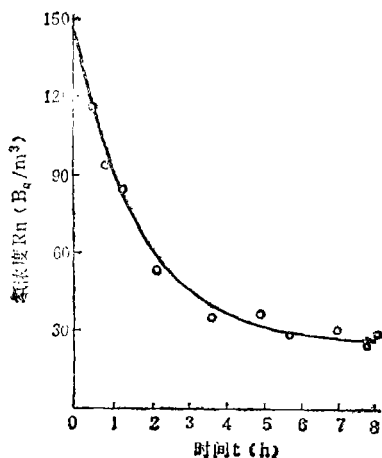


图 3 通风时氡浓度随时间的变化曲线

(三) 氡平均析出率

由 (1) 式知 α 是计算 Rn_{eq} 的关键参数. 国外最近研究发现, 随着 α 探测室中氡浓度的升高, 会出现氡“反扩散”和“泄漏”现象, 使 α 值的确定更加复杂化. 并且探测室越小, “反扩散”影响越大. 目前我国大探测面的测试仪研制尚处空白. 为此提出一种简便、实用的计算 α 值方法. 即以整个待测空间为一个探测室, 将其封闭. 待其空间的氡浓度达到平衡后, 用现有的测氡仪测出平衡氡浓度 Rn_2 . 据多次试验数据 α 与 Rn_2 的关系为:

$$\alpha = A \cdot \frac{\lambda_0 V}{S} Rn_2$$

式中,

λ_0 为氡衰变常数 $2.1 \times 10^{-6}/s$; A 为“反扩散”及渗漏修正系数 (2.5—3.5).

夏季测 α 值建议 A 值取 2.5, 春秋取 3.0, 冬季取 3.5.

(四) 平衡因子 $F^{[10]}$

F 不但与 λ_v 密切相关, 而且与氡子体沉降率、未结合份额及结合率有关. 结合率又强烈依赖于含尘量. 经试验及理论分析计算, 三者关系如图 4. 经验证, 计算值与实测值偏差在 10% 以下.

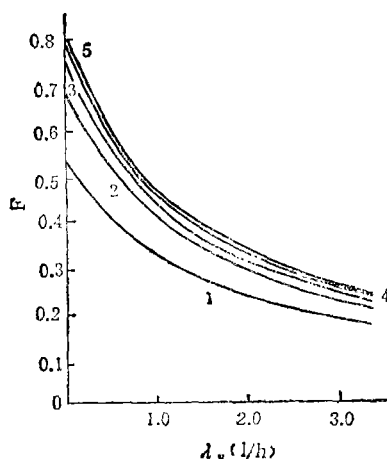


图 4 不同含尘量时平衡因子和通风率的关系

1. $d = 2.2 \times 10^4/L$ 2. $d = 6.7 \times 10^4/L$
3. $d = 11.1 \times 10^4/L$ 4. $d = 15.6 \times 10^4/L$
5. $d = 20.0 \times 10^4/L$

(五) 防氡通风率

1. 防氡通风率计算表

根据上述确定 α 、 Rn_{eq} 及 F 的方法, 并按 $Rn_0 = 7Bq/m^3$, 编制防氡通风率计算表 (表 2). 如当工程的 $Rn_2 = 3000 Bq/m^3$, $\frac{V}{S} = 0.86m$, 含尘量 $d = (15 \sim 16) \times 10^4/L$ 时, 可按表 2 查出对应的 $\alpha = 0.0189 Bq/m^3 \cdot s$, 并 $\lambda_v = 0.6/h$ 时, 经 8.23 h 通风后, 工程内氡子体浓度基本平衡于 $86.62 Bq/m^3$, 小于 DAC, 即 $\lambda_v = 0.6/h$ 为该工程防氡通风率的合理下限值. 此表经验证, 理论计算值与实测值符合较好.

2. 几个需说明的问题

表 2 防氡通风率计算表举例 $\frac{V}{S} = 0.86\text{m} \quad d = 11 \times 10^4 \sim 15.6 \times 10^4/\text{L}$

封闭平衡 氡浓度 Rn_0 Bq/m^3	氡平均 析出率 α $Bq/m^2 \cdot s$	通 风 率 λ_v (1/h)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	2.0
		平 衡 时 间 t_{eq} (h)										
		46.49	24.09	16.26	12.27	9.85	8.23	7.07	6.19	5.51	4.96	2.49
500	0.00316	96.98	50.78	34.68	26.52	21.61	18.33	16.00	14.26	12.91	11.83	7.14
1000	0.00631	189.02	96.56	64.44	48.21	38.46	31.99	27.40	23.98	21.35	19.26	10.27
2000	0.01263	373.09	188.14	123.95	91.57	72.17	59.31	50.20	43.44	38.23	34.12	16.55
3000	0.01894	557.16	279.72	183.46	134.94	105.88	86.62	73.00	62.89	55.12	48.98	22.82
4000	0.02525	741.24	371.30	242.98	178.31	139.58	113.94	95.80	82.34	72.00	63.83	29.09
5000	0.03156	925.31	462.88	302.49	221.67	173.29	141.26	118.60	101.80	88.89	78.69	35.37

(1) λ_v 指新风通风率,且只适用于连续通风状态。间断通风时应根据风机开停比查间断防氡通风率表。

(2) 应考虑通风系统漏风及送风不均匀情况。建议根据具体情况在 1.3—1.6 范围选取修正该系数。

(3) 当进风系统是地道或其它能使进风的 Rn_0 有明显增加的进风道时,应注意使按表查出的氡子体平衡浓度加上 $(Rn_0 - 7Bq/m^3)/2$ 之和不超过 $93 Bq/m^3$ 所对应的 λ_v 。建议对进风道进行屏蔽防氡处理(如喷涂铅偏)。

(4) 根据辐射防护原则,在条件允许时不应仅满足于防氡通风率下限值,应尽量保持较大通风率。

安装空气负离子发生器。

(二) 地下工程中氡水平较高。有 54% 的使用地下工程超出氡子体导出空气浓度。工作人员因吸入氡子体所致年有效剂量当量均值为 3.92 mSv , 是限值 3 mSv 的 131%。可见地下工程中氡水平急待降低。氡害问题应引起重视。

(三) 通风是地下工程防治氡害简便易行、经济有效的措施。防氡通风率建议采用本文提出的“防氡通风率计算表”进行计算。

(四) 对个别氡水平很高,单采用通风防氡时通风率过大,通风系统容量达不到或很不经济的工程,建议采用通风与屏蔽法结合的综合防氡措施。

参 考 文 献

- [1] Hawkins, L. H., *Ergonomics*, **21**(4), 273~278 (1978).
- [2] Krueger, A. P., *Int. J. Biometeor*, **13**(1), 25~38 (1969).
- [3] Krueger, A. P., *Science*, **193**, 1209 (1976).
- [4] Maczynski, *Int. J. Biometeor*, **15**(1), 11~12 (1971).
- [5] Hawkins, L. H., *BSEE*, **4**, 8 (1982).
- [6] 钮式如, *环境与健康* **1**(2), 38~40 (1982).
- [7] 李安伯, *静电*, **1**, 1~2 (1985).
- [8] 放射卫生防护基本标准(国际 GB4792-84)
- [9] UNSCEAR, Report, 1982.
- [10] SWEDJEMARK, GUN. ASTRI, *Health Physics*, **45**(2), 453~462 (1983)
- [11] 王作元, *中华放射医学与防护*, **4**(3), 67~73 (1984),

八、结论与建议

(一) 使用的地下工程,特别是使用的掩土工程中空气负离子浓度低于地面室内正常值,均值为 201 个/cm^3 , 且单极性系数高达 2.0, 离子环境急待改善。影响空气离子浓度的主要因素是氡及其子体浓度、空气含尘量、湿度和通风空调系统。空气离子浓度正相关于氡浓度,负相关于含尘量。改善离子环境的有效措施是:在满足“放射卫生防护标准”、含尘卫生标准及舒适湿度要求基础上,适当

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

An Experimental Research on Mechanism of Biological Activated Carbon and Theory Concerned

Liao Zhimin, Xu Shusen and Lan Shucheng (Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing)

In this experiment, the up-flow columns were used. By controlling different concentrations of dissolved oxygen and phenol in influent and effluent, the quantity of bioregeneration were calculated. Meanwhile the hypothesis of "the outer-cell enzyme" has been discussed. (See pp. 2—7)

Prediction about the Influence of Hot Water Discharged from the Nuclear Power-Station on Oxygen-Lack in Bottom Water of the Daya Bay Guangdong Province

Lin Hongying and Han Wuying (South China Sea Institute of Oceanology, Academia Sinica, Guangzhou)

In recent years, the investigative data for essential factors of water chemistry in the Daya Bay show that one of the natural eco-environmental characteristics is that water is seasonally divided into layers, and there appears lack of dissolved oxygen in bottom layer during April—October. When hot water from the Nuclear Power Station is discharged to the Daya Bay, temperature of the surface layer water will increase and the phenomenon will be more obvious. According to calculation, if water temperature increases 1—2°C, the affected area will widen 3—5 km², duration of the layer divided will delay 33—67 days, and consumptive rate of dissolved oxygen will increase 14—25%. Finally the authors suggest that if the Power Station draw cooling water from the bottom layer, the primary productivity would increase 2—116% and consumptive rate of dissolved oxygen will decrease 7.7—14%. (See pp. 7—12)

Nitric Acid and Ammonia in the Air of the Emei Mountain area, Sichuan Province

Sun Qingrui, Wang Meirong and Shao Kesheng (Department of Technological Physics, Peking University, Beijing)

HNO₃(g) and NH₃(g) in the air have been measured in four different heights at the Emei Mountain area in October of 1985. The data analysis shows that vertical profiles of the concentrations of HNO₃ and NH₃ increased in a factor of e as the heights dropped a distance of 780 m

and 1000 m respectively. During that time the equilibrium between NH₄NO₃(s) and HNO₃(g), NH₃(g) didn't exist. Quite good correlation has been obtained between HNO₃(g) and O₃ in the air. Calculations suggest that maximum contributions of H⁺ and NO₃⁻ caused by HNO₃(g) in fog water at the mountaintop are 11% and 8% respectively. (See pp. 12—16)

An Experiment of Pathogeny of Kaschin-Beck Disease Caused by Humic Compounds in Water

Wang Weizhe and Feng Lanfei (Liaoning Institute of Fundamental Medicine, Shenyang)

This paper introduces briefly the results of pathogeny of Kaschin-Beck disease (KB) which the authors have researched into for many years. (1) In KB zone, there exists humic substance in drinking water, which causes the damage of chondrocytes *in vitro*. As water quality was improved and the substance lessened, the incidence of KB disease in the residents had dropped and the effects of chondrocyte damage became lower; (2) Selenium can be used to prevent chondrocyte damage caused by humic substance. This result corresponds to the disease that probably occurs in the zone of low selenium nutrition. (3) Cerebral and humic substance in the KB zone has caused GBH-Px activity of rat blood decreasing. (4) The initial results showed that hydroxyl group of the organic compound might affect chondrocyte damage. (See pp. 16—20)

An Investigation of Air Ions and Radon Hazard in the Underground Installations

Tian Zhigian, Feng Yueduan and Yuan Daiguang (Engineer Unit of Headquarters of the General Staff of PLA)

This paper deals with 3-years investigative results of 37 underground installations in Changsha, Wuhan, Beijing, Shenyang and Dalian cities. The results show that as the installations have been in use, mean concentration of air anions is 201/cm³, much lower than that at ordinary rooms, while mono-polarity index are 2.0, much higher. The main factors affecting air anions are radon and its daughter, dust and air humidity, ventilating conditions etc. It has been determined that concentration of radon daughter in the air is 93 Bq/m³. In this paper, the method for estimating radon exhalation rate, radon proof ventilation rate and effective way for improving air anions have been discussed. (See pp. 21—25)

Enactment of the Standard Concerning Polluted Sediment Types in the Rivers

Fang Yuqiao et al. (Department of Chemistry and