

文章编号: 1000-6931(2001)01-0045-06

半干旱地区天然黄土包气带中氚的运移特征

王志明, 杨月娥

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

摘要:通过氚在黄土包气带现场示踪试验结果的分析,发现 ^3H 纵向分布在相对浓度较大时是对称的,而相对浓度较小时则不对称。通过对横向迁移数据的处理,得到了 ^3H 在天然黄土中的横向浓度分布方差 σ_y^2 分别为 68.4 cm^2 (A坑, $t=780\text{ d}$, 埋深 76 cm 处) 和 138.5 cm^2 (B坑, $t=779\text{ d}$, 埋深 110 cm 处)。横向扩散参数约为纵向扩散参数的 $1/3$ 。在埋深较大的B坑中,快成分份额 $f(t, U_q)$ 随时间变化不大,相对速度 $U_q(t, x_q)$ 随时间的变化也不大。在此前提下,按快成分计算出关心地点的浓度在某些情况下大于常规计算结果。这表明,以质心运动速度为代表的常规计算在某些情况下是不保守的。

关键词:黄土包气带;氚;现场示踪试验;运移;浓度分布方差;扩散参数

中图分类号: X830.1 文献标识码: A

^3H 迁移的现场示踪试验是在中国辐射防护研究院野外试验场包气带黄土的 A 和 B 两个试验坑内进行的。试验坑的面积均为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 示踪源层分别铺设于各坑坑底的中央, 上覆以黄土。示踪源层的面积为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, 源层厚度为 0.7 cm 。示踪源层在两个坑中的埋深不同。在 A 坑中, 示踪源层的埋深为 30 cm , 在 B 坑中为 100 cm 。试验详情参见文献[1]、[2]。

该试验场区位于半干旱区域的黄土台塬上, 海拔高度为 $950 \sim 955\text{ m}$ 。根据试验期间的观测, 试验场区年平均降水量为 438.2 mm , 蒸发量为 $1\ 828\text{ mm}$ 。由于降水量小, 空气的相对湿度也较小, 而蒸发量相对较大, 因而, 降水垂直入渗量甚小^[3,4]。

氚通常被用作示踪剂研究水在地质介质中的运动。本试验的目的是用氚研究水分在半干旱地区黄土中的行为, 特别是在地质介质中的水动力弥散特征, 这不仅为核素在地质介质的迁移模式以及安全评价模式提供计算所需要的参数, 而且可以验证相应的水流模式。

1 浓度分布曲线的对称性

浓度分布曲线的对称性不仅反映了核素的扩展状况, 也反映了核素在扩展过程中扩展的

收稿日期: 1999-10-29; 修回日期: 2000-03-07

作者简介: 王志明(1939—), 男, 河北任县人, 研究员, 环境科学专业

“方向性”。浓度分布曲线的对称性是以浓度分布的质心位置 $x_0(t)$ 为基准衡量的,并以不对称因子 G 作为衡量指标。 G 表示为

$$G = W_R / W_L$$

式中: W_R 为某浓度时,曲线右侧坐标到质心的距离(cm), $W_R = x_q - x_0$; W_L 为同一浓度时,曲线左侧坐标到质心的距离(cm), $W_L = x_0 - x_s$; x_0 为浓度分布质心坐标(cm); x_s 、 x_q 分别为相应某一浓度时曲线左、右侧的坐标(cm)。

用真空-加热蒸馏装置将土壤中的水分分离并收集,加入 10 mL Instar-gel 溶液,然后将此溶液与冷凝器壁的清洗水一起移入计数杯中,用 Packard 2200CA 液体闪烁计数器测量其中 ^3H 的含量。用此方法处理 ^3H 的回收率平均为 $(89.9 \pm 2.0)\%$ 。

浓度分布曲线对称性分析示意图示于图 1。图 2 示出了 A、B 两坑浓度分布曲线在相对浓度 (C/C_{\max}) 为 0.1 和 0.01 时不对称因子 G 随时间的变化。在相对浓度为 0.1 的情况下,A、B 两坑的 G 值为 1.00 ~ 1.13,表明曲线基本对称。在相对浓度为 0.01 的情况下,A 坑的分布曲线呈现了不对称性,所有的不对称因子 $G > 1$,即曲线的右侧宽度均大于左侧;B 坑的分布曲线也略微呈现了不对称性,但其不对称性不同于 A 坑。其特征表现在有时左侧宽度大于右侧,有时左侧宽度与右侧宽度相当。这可能是由 B 坑浓度分布曲线的质心出现上下移动所造成的。与质心随时间的变化^[4]对照就会发现,在浓度分布质心上升的时候,曲线的左侧宽度都大于右侧。

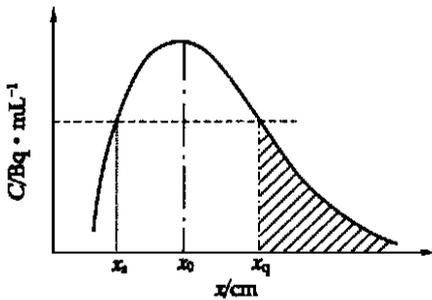


图 1 ^3H 在土壤中的浓度分布示意图

Fig. 1 Diagram of concentration distribution of ^3H in soil

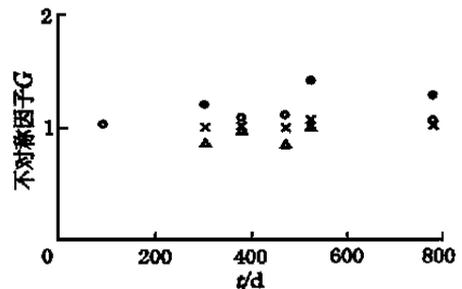


图 2 ^3H 浓度分布的不对称因子随时间的变化

Fig. 2 Change of the non-symmetry factor of concentration distribution of ^3H with time
A 坑: — $C/C_{\max} = 0.1$; — $C/C_{\max} = 0.01$
B 坑: × — $C/C_{\max} = 0.1$; — $C/C_{\max} = 0.01$

2 横向扩散

为了解 ^3H 在包气带土壤中的横向迁移情况,在 780 d 时采样测量。A 坑中土芯样采集分布示于图 3。B 坑采样布局与 A 坑相同。

在 $t = 780$ d 时,A12 ~ A14 的平均质心位置 $x_0 = 46.0$ cm,取土芯样 A11 和 A15 中 ^3H 在此深度的浓度以及 A12 ~ A14 在此处的平均浓度作为 ^3H 在此时刻的横向分布,那么,由此 3 个数据即可确定一条正态分布曲线(图 4)。由此曲线可以得出浓度分布方差,并依此作为 ^3H 的横向浓度分布方差 $\frac{2}{y}$,则 $\frac{2}{y} = 68.4 \text{ cm}^2$ ($t = 780$ d,埋深 76 cm 处)。而此时刻 ^3H 的纵向浓

度分布方差 $\sigma_y^2 = 785 \text{ cm}^2$ ^[4]。两者相比,横向扩散参数 σ_y 约为纵向扩散参数 σ_x 的 30%。

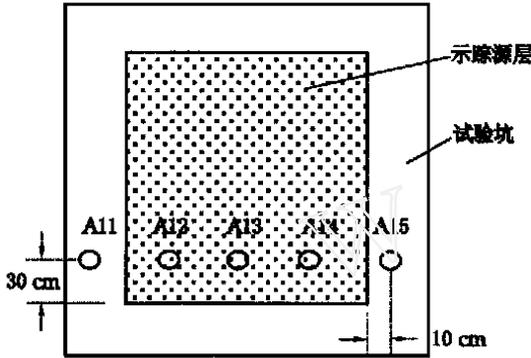


图3 土芯样采集分布示意图(A坑)

Fig.3 Diagram of distribution of columns collected in pit A

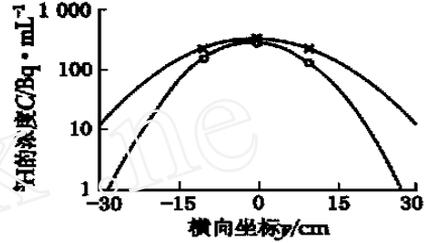


图4 试验数据及正态分布曲线

Fig.4 Measured data and normal distribution curve
—A坑; ×—B坑

使用同样的方法,也可得出B坑中³H的横向浓度分布方差 $\sigma_y^2 = 138.5 \text{ cm}^2$ ($t = 779 \text{ d}$,埋深 110 cm 处)。而此时此刻³H的纵向浓度分布方差 $\sigma_x^2 = 1183 \text{ cm}^2$ ^[4]。两者相比,横向扩散参数 σ_y 约为纵向扩散参数 σ_x 的 34%。

3 浓度分布曲线中快成分的运动

在放射性废物近地表处置安全评价模式中,对于瞬时释放来说,通常使用的是放射性核素在地质介质中的平均运动速度,即质心的运动速度。然而,核素的浓度在地质介质中具有一定的分布。一部分核素以比平均速度慢的速度向前运移,而另一部分却以大于平均速度的速度向前运移。对于慢于平均速度的那部分核素来说,按平均速度进行的评价是保守的。但是,对于运移速度大于平均速度的那部分核素来说,按平均速度进行的评价则可能是不保守的。因为快于平均速度的那部分核素能够更早地到达关心地点,从而更早地对人产生照射。而且,由于放射性核素特有的衰变特征,对于半衰期相对中等或较短的那些核素来说,时间的缩短将影响放射性核素的衰变量,因此,不考虑快于平均速度的那部分核素可能极大地低估在关心点对人的辐射后果。

把浓度分布曲线中位于质心位置 x_0 右侧的部分称之为核素运动的快成分(图1),因为它们不仅在质心 x_0 之前运移,而且其速度大于核素的平均运移速度(即质心的运移速度)。把快成分的最小运动速度与质心运移速度之比叫做快成分的相对速度(也称作快成分的迁移倍速),记作 $U_q(t, x_q)$,即 $U_q = (x_q/t) / (x_0/t) = x_q/x_0$ 。同时,把某一组快成分中所包含的核素总量 A_q (图1中的阴影部分)与释放的核素总量 A_0 之比叫做浓度分布快成分份额,并记作 $f(t, U_q)$ 。研究浓度分布曲线中快成分的运动,可以为更加准确的安全评价创造条件。定义浓度分布的快成分份额为

$$f(t, U_q) = \frac{A_q}{A_0} = \frac{\int_{-x_q}^{+} C(x, t) dx}{\int_{-}^{+} C(x, t) dx} \quad (1)$$

式中： $f(t, U_q)$ 为 t 时刻浓度分布曲线中相应于相对速度 U_q 的快成分所占的份额(无量纲)； x 为纵向坐标(cm)，定义示踪源层中间为零点，垂直向下为正方向，向上为负方向； x_q 为相应于相对速度 U_q 的快成分坐标的最小值(cm)； $C(x, t)$ 为在 t 时刻埋深 x 处 ^3H 的浓度(Bq/mL)。

不同相对速度 U_q 下，快成分份额 $f(t, U_q)$ 随时间的变化示于图 5。由图 5a 可看出：除 $U_q=2$ 外，A 坑中 ^3H 的快成分份额 $f(t, U_q)$ 有随时间增长而下降的趋势，但下降幅度并不大；在 $U_q=2$ 时， $f(t, U_q)$ 随时间变化不大。对于 B 坑，不同 U_q 下均看不出 $f(t, U_q)$ 随时间增长而下降的趋势(图 5b)。因此， $f(t, U_q)$ 可写作 $f(U_q)$ 。与 A 坑相比，由于 B 坑埋得更深，B 坑的结果更接近实际情况。

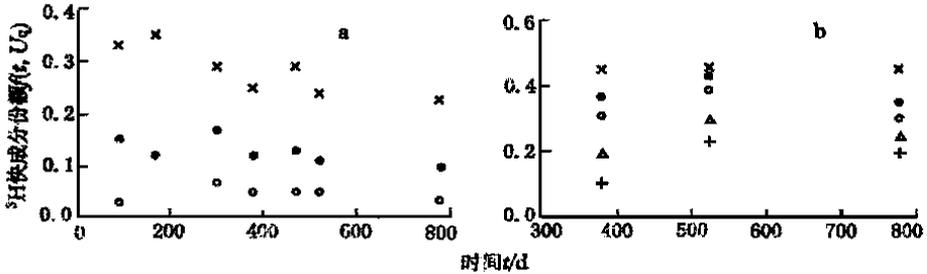


图 5 A 坑(a)与 B 坑(b)中快成分份额随时间的变化

Fig. 5 Change of faster component fraction with time in pits A(a) and B(b)

a: x— $U_q=1.2$, — $U_q=1.6$, — $U_q=2.0$;

b: x— $U_q=1.2$, — $U_q=1.6$, — $U_q=2.0$, — $U_q=3.0$, +— $U_q=4.0$

图 6 示出了 A、B 两坑中 ^3H 不同快成分份额 $f(t, U_q)$ 所对应的相对速度 $U_q(t, x_q)$ 随时间的变化。由图 6 可看出：在试验期间，随着时间的增长， ^3H 的相对速度 $U_q(t, x_q)$ 并无下降

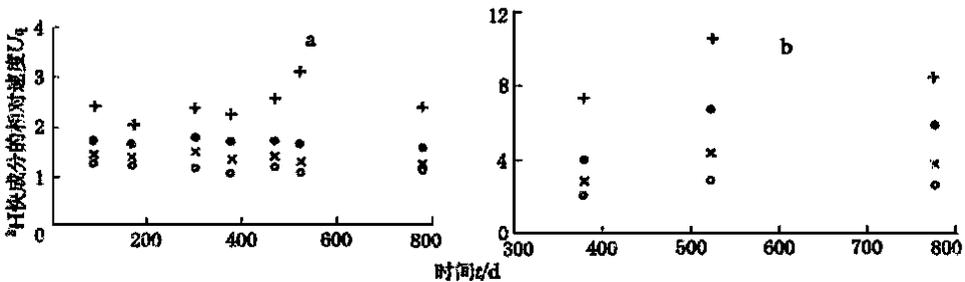


图 6 A 坑(a)与 B 坑(b)中相应快成分的相对速度

Fig. 6 Relative velocity corresponding to faster component in pits A(a) and B(b)

— $f=0.3$; x— $f=0.2$; — $f=0.1$; +— $f=0.01$

趋势。因此, $U_q(t, x_q)$ 也可写作 $U_q(x_q)$ 。

4 快成分对辐射后果计算的影响

对于瞬时释放来说,放射性核素在下游某点的浓度可表达为

$$C_i = \frac{A_i}{n_e R_d} X(x, t) Y(y, t) Z(z, t) \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 种核素在下游 (x, y, z) 处 t 时刻的浓度 (Bq/m^3) ; A_i 为第 i 种核素的瞬时释放总量 (Bq) ; n_e 为地质介质的有效孔隙度(无量纲); R_d 为核素的延迟系数(无量纲); $X(x, t)$, $Y(y, t)$, $Z(z, t)$ 分别为纵向 (x) , 横向 (y) 和垂直方向 (z) 的格林函数 (m^{-1}) ; t 为核素的迁移时间 (a) 。

按常规质心运动速度计算的下游某点的最大浓度为 C (Bq/m^3) , 而按快成分计算核素到达同一地点的最大浓度为 C_q (Bq/m^3) 。由于除 $X(x, t)$ 中包含核素的指数衰减项以外, $X(x, t)$ 的其它部分以及 $Y(y, t)$ 、 $Z(z, t)$ 均只是位置和时间的函数, 因此,

$$\frac{C_q}{C} = \frac{A_q}{A_0} \times \frac{\exp(-t/t_q)}{\exp(-t)} \quad (3)$$

式中: A_q 为快成分所包含的核素总活度 (Bq) ; A_0 为瞬时释放核素的总活度 (Bq) ; t_q 为该组快成分到达计算点的最长时间 (a) ; t 为核素浓度分布质心到达同一地点的时间 (a) ; λ 为核素的衰变常量 (a^{-1}) 。

从图 5、6 可看出:在试验期间,快成分份额 $f(t, U_q)$ 和快成分的相对速度 $U_q(t, x_q)$ 随时间变化均不大,且随着时间的增长,它们均无明显的下降趋势。如果假定快成分份额 $f(t, U_q)$ 和快成分的相对速度 $U_q(t, x_q)$ 不随时间变化,那么,对于同一核素在同一介质中的迁移来说, U_q 与 f 就是单一的对应关系,因此,

$$\frac{C_q}{C} = f(t, U_q) \times [\exp(-t)] \left[\frac{1}{U_q} \right] \quad (4)$$

C_q/C 与 $\exp(-t)$ 的关系示于图 7。由图 7 可知:在某些条件下, C_q/C 小于 1, 表明按快成分计算的结果不会超过常规计算的值;而在另一些条件下, C_q/C 大于 1, 这说明先期到达

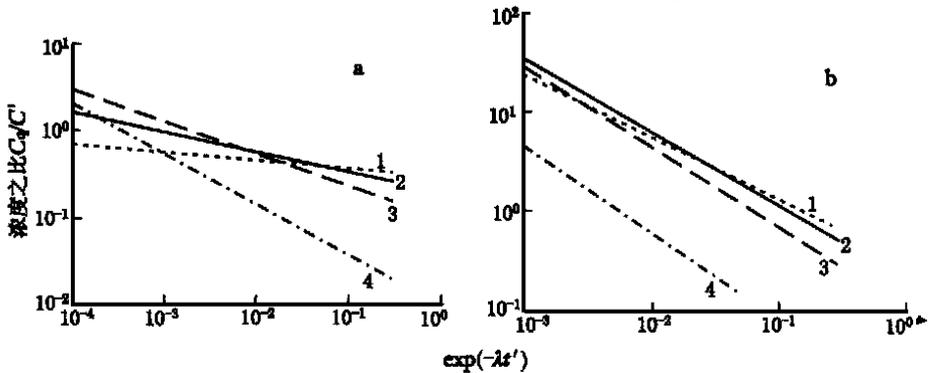


图 7 A 坑(a)和 B 坑(b)实测参数计算结果的比较

Fig. 7 Comparison of calculated results on the basis of data from pit A (a) and pit B (b)

1 — $f = 0.3$; 2 — $f = 0.2$; 3 — $f = 0.1$; 4 — $f = 0.01$

的核素对人的照射不仅在时间上提前,而且,其辐射后果也超过了常规计算结果。按常规计算的值偏低,亦即是不保守的,因而,核素浓度分布快成分在安全评价中的作用不可忽视。

参考文献:

- [1] 中国辐射防护研究院,日本原子力研究所. 低水平放射性废物浅地层处置安全评价方法研究: CIRP/0051, ZL/93-001/X84[R]. 太原:中国辐射防护研究院,1993.
- [2] 郭择德,王志明,李书绅,等. 黄土包气带中放射性核素迁移的现场试验[J]. 辐射防护,2000,20(1,2): 21~30.
- [3] 李明香,马炳辉,刘锦麟,等. 黄土包气带水分运移的现场研究[J]. 辐射防护,2000,20(1,2):91~99.
- [4] 王志明,郭择德,李书绅,等. 天然条件下 ^3H 在黄土包气带中的迁移[J]. 辐射防护,2000,20(1,2):57~60.

Transport Characteristics of Tritium in Unsaturated Loess of Semi-arid Area Under Natural Condition

WANG Zhi-ming, YANG Yue-e

(China Institute for Radiation Protection, P. O. Box 120, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Through analyses of the field tracer migration test results of tritium in unsaturated loess located in semi-arid area, it is found that the longitudinal concentration distributions of ^3H are symmetry at higher relative concentration and non-symmetry at lower relative concentration. From processing of the migration test data the lateral concentration distribution variances (σ_y^2) of ^3H are obtained. σ_y^2 is 68.4 cm^2 (in pit A, at $t = 780\text{ d}$ and depth of 76 cm) and 138.5 cm^2 (in pit B, at $t = 779\text{ d}$ and depth of 110 cm), respectively. The lateral diffusion parameter is about one third of the longitudinal diffusion parameter. It is found from analyzing faster component of diffusion of ^3H that the changes of both the faster component fractions, $f(t, U_q)$, and the relative velocities, U_q , with time in pit B are not significant. Under the prerequisite, the concentrations calculated by faster component at point concerned are larger than that by conventional calculation under some conditions. It shows that it is not conservative to use the velocity of the center of mass as representative to conduct conventional calculation under some conditions.

Key words: unsaturated loess; tritium; field tracer migration test; transport; concentration distribution variance; diffusion parameter