

土壤水取样技术应用基础研究

——土壤水提取量与土壤含水量关系

荆继红 韩双平

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄)

摘 要 土壤水取样技术在环境地质研究领域,特别是包气带污染质迁移、集聚研究,浅层地下水的污染预测与防治,盐渍土改良及农业生态研究等方面具有重要的应用价值。因而,以实验资料为依据,研究了土壤水取样技术某些重要应用基础问题,重点描述了土壤水取样器在 4 种不同岩性中的土壤水提取量与土壤含水量的关系,岩性中的土壤水提取量与土壤吸力的关系,并建立了相应的相关方程,以及对影响土壤水取样速率和取样量主要因素等问题进行了分析。

关键词 土壤水 含水量 土壤吸力 提取量 取样器

土壤水取样器(Soil Water Sampler)是提取土壤水(溶液)样的仪器。土壤水取样技术是原位监测包气带和潜水含水层系统中溶质动态变化的基础技术之一。这项技术在美国、法国、日本等国发展较早,美国在 70 年代就生产出土壤水取样器,初期取样深度可达 1.8 m,以后又生产出取样深度可达 15 m 以上的土壤水取样器。日本生产出地表以下 0.1 ~ 3 m 深度范围内使用的土壤水提取器(Soil Water Extractor)。中国广泛开展土壤水(溶液)方面的研究比较晚,土壤水取样技术的发展受到制约,1991 年地质矿产部水文地质工程地质研究所开发研制出 TQ-1 型和 TQ-2 型土壤水取样器,提取土壤水样的深度可达 20 m 以上,并可根据实际需要采取不同方式埋设土壤水取样器,定期或不定期地重复使用,获得原位提取土壤水(溶液)样的效果,取得不同时段具有可比性的土壤水(溶液)资料。特别是土壤水取样器采用暗埋方式时,在取样过程中可离开土壤水取样器埋设位置的上覆地表一定距离,不干扰和破坏监测点处的地面条件。所以,此项技术的开发为土壤水中溶质运移的研究提供了必要的监测手段。随着我国环境地质、农业生态等领域的研究深入发展,土壤水取样技术得到了推广应用。

1 土壤水样提取量与含水量关系实验研究

土壤水取样器的一个重要部件是陶土头(多孔

杯),当土壤水取样器插入待取样的土壤中时,要保持陶土头与土壤的良好接触,多孔的陶土头就相当于土壤孔隙介质的延伸。一般情况下,土壤具有一定的吸力($s > 0$),土壤水(溶液)不可能进入陶土头内部。但是,当土壤水取样器内部人为地造成一定的负压后,并且当负压的绝对值大于土壤吸力时,在陶土头内外之间形成压力差,在此压差作用下土壤水(溶液)就会通过陶土头管壁缓缓进入土壤水取样器内部。土壤水进入取样器内的速度除了与陶土头的渗透率和陶土头的表面积大小以及其内外压差的大小有关外,主要受土壤导水率 $k(\theta)$ 值的大小制约。 $k(\theta)$ 是土壤含水量的函数,因此对于同一种土壤,土壤含水量不同,对土壤水(溶液)进入土壤水取样器的速度影响很大。

选用粗砂、粉细砂、亚砂和亚粘土等 4 种土壤作为试土,为此,进行了如下模拟实验。

1.1 实验方法

粗砂、粉细砂、亚砂 3 种试土各装在一个试筒中进行实验。为了缩短实验时间,亚粘土配成了 4 种不同土壤含水量的土样,分别装在 4 个试筒中进行实验。

每个试筒安装一支短土壤水取样器,为了在实验过程中防止土壤水分的蒸发损耗,在试筒顶部用塑料布覆盖。取样器的取样管与试筒外的取样容器进水管相连接,取样容器的抽气管与真空泵连接。

实验时,开启真空泵,当真空表指针达到 740 mmHg 时,封闭取样容器的抽气管口,关闭真空泵,并记录起始时间。经过一段时间后,取样容器中获得一定水样量,这时取出取样容器中的水样称重(实验用千分之一的电子天平称重),获得该时段取得的土壤水(溶液)量,同时记录该时段结束时间。然后再重复上述取样过程,直至整个实验结束。

实验结束时,测定实验土壤的含水量和干容重。再根据总的实验土壤的重量和各取样时段提取的土壤水(溶液)量,推算出各个取样时段内的土壤重量含水量和体积含水量。

1.2 实验结果

1.2.1 粗砂实验结果 图 1 为粗砂中土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量的散点图及相关曲线。由实验数据建立的土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量的相关方程如下:

$$Q = 0.0616w^{3.8818} \tag{1}$$

$F_{\text{计}} = 359.517$;显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $F_{\text{表}}(0.01, 1, 16) = 9.33$ 。

式中, Q 为土壤水提取量(mL/h); w 为土壤重量含水量(%); $F_{\text{计}}$ 为 F 的计算值; $F_{\text{表}}$ 为 F 的查表值。

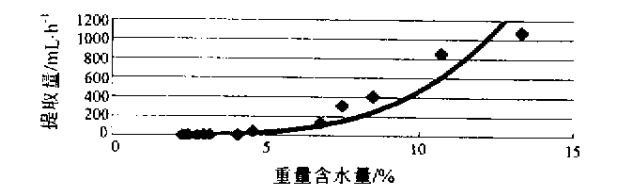


图 1 粗砂中土壤水提取量与土壤重量含水量关系
Fig.1 Relation between soil water extracted and weight moisture content in coarse sand

1.2.2 粉细砂实验结果 图 2 为粉细砂土中土壤水(溶液)提取量与土壤体积含水量的散点图及相关曲线。

由实验数据建立的土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量和土壤体积含水量的相关方程分别为:

$$Q = 0.0119e^{0.5098w} \tag{2}$$

$$Q = 0.0142e^{0.333\theta} \tag{3}$$

$F_{\text{计}} = 211.92$ 对于显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $F_{\text{表}}(0.01, 1, 16) = 8.53$ 。

式中: Q 为土壤水(溶液)提取量(mL/h); w 为土壤重量含水量(%); θ 为土壤体积含水量(%); $F_{\text{计}}$ 为 F 的计算值; $F_{\text{表}}$ 为 F 的查表值。

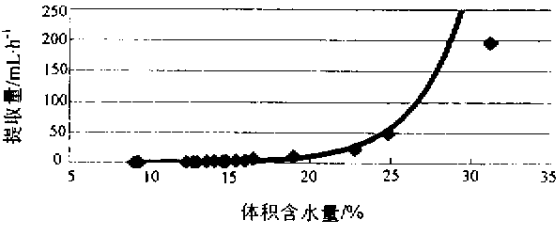


图 2 粉细砂中土壤水提取量与土壤含水量关系
Fig.2 Relation between soil water extracted and weight moisture content in tiny sand

1.2.3 亚砂土实验结果 图 3 为亚砂土中土壤水(溶液)提取量与体积含水量的散点图及相关曲线。由实验数据建立的土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量和土壤体积含水量相关方程分别为:

$$Q = 0.23e^{0.3843w} \tag{4}$$

$$Q = 0.23e^{0.2689\theta} \tag{5}$$

$F_{\text{计}} = 148.78$,显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $F_{\text{表}}(0.01, 1, 16) = 8.53$ 。

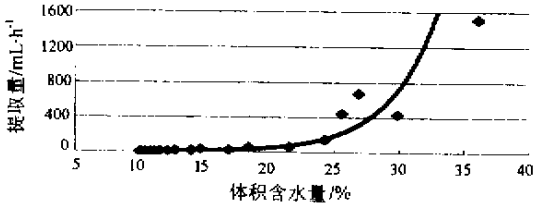


图 3 亚砂土中土壤水提取量与土壤体积含水量关系
Fig.3 Relation between soil water extracted and volume moisture content in clay sand

1.2.4 亚粘土实验结果 图 4 为亚粘土中土壤水(溶液)提取量与体积含水量的散点图及相关曲线。由实验数据建立的土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量和土壤体积含水量的相关方程分别为:

$$Q = 0.0016e^{0.3978w} \tag{6}$$

$$Q = 0.0012e^{0.2502\theta} \tag{7}$$

$F_{\text{计}} = 204.43$,显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $F_{\text{表}}(0.01, 1, 34) = 7.46$ 。

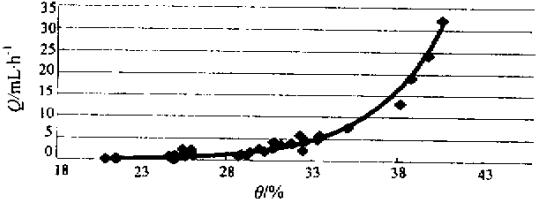


图 4 亚粘土中土壤水提取量与土壤体积含水量关系
Fig.4 Relation between soil water extracted and volume moisture content in sandy clay

1.3 实验结果分析

(1)上述所有相关方程经显著性检验,在显著性

水平 $\alpha = 0.01$ 的条件下, F 的计算值 $F_{\text{计}}$ 远大于 F 的查表值(临界值)的 4 倍,表明上述各方程都是极显著相关的。土壤水(溶液)提取量与土壤重量含水量和体积含水量之间有着很强的规律性,在粗砂中二者之间呈幂函数关系,而在粉细砂、亚砂土和亚粘土中,二者呈指数关系。可以看出土壤含水量较小的变化将对土壤水取样器提取土壤水(溶液)量产生很大的影响。这主要是由于土壤含水量的微小变化都会引起非饱和土壤导水率 $k(\theta)$ 较大的变化(雷志栋等,1998;荆思春等,1994),如贾村轻亚砂土的土壤体积含水量在 10%~42% 范围内变化,将引起非饱和土壤导水率变化范围高达 3 个数量级以上。土壤含水量的变化同时也会引起土壤基质势的变化。因此,土壤含水量的较小变化,在很大程度上影响着土壤水的传输能力和土壤水渗入土壤水取样器内的驱动力,显著地影响到土壤水(溶液)的提取量。

(2) 对于不同的土壤,土壤水取样器提取土壤水样量的能力显著不同,按其大小排列的顺序为,粗砂、粉细砂、亚砂土、亚粘土。例如,在其它条件相同的情况下,土壤重量含水量为 10% 时,取样器在粗砂中提取的土壤水样量分别为亚砂土、粉细砂、亚粘土中的 43.7 倍、240.9 倍和 5 490.8 倍。

(3) 土壤水取样器在不同的土壤中使用,土壤含水量愈低,提取土壤水样量的差异愈大,随着含水量的增加,其差异显著减少。以上述 4 种实验土壤为例,利用土壤提取量与重量含水量的相关方程,计算重量含水量分别为 10%、15%、20%、25% 时,取样器在 4 种土壤中提取的土壤水样量,表 1 给出了粗砂与亚砂土、粉细砂、亚粘土中提取量的比值。 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 分别表示粗砂、亚砂土、粉细砂、亚粘土中的提取量(mL/h)。可以看出,重量含水量由 10% 变化到 25%, Q_2/Q_1 从 43.72 倍减小到 4.81 倍; Q_3/Q_1 从 240.88 倍减小到 4.03 倍; Q_4/Q_1 从 5490.82 倍减小到 493.09 倍。对于同一种土壤,如亚粘土、粉细砂和亚砂土,随着土壤含水量的增加,土壤水提取量均以指数函数关系增加。因此,当土壤含水量较高时,土壤水取样器在各种土壤中使用,均可提取较多的土壤水(溶液)量,所以在大的降水或灌溉后及土壤剖面高含水量地段为提取土壤水(溶液)提供了良好的条件。但是在土壤水含水量较低时,在一些土壤中仍能提取较多的土壤水量(如砂中),而在含细颗粒较多的土壤中,只能提取少量的土壤水(如亚粘土等)。即使如此,对于需要较少水样的测试项目仍然是非常有用的。必要时在同一深度增加取样器支数也是增加土壤水提取量的一种方法。

万方数据

表 1 粗砂与亚砂土、粉细砂、亚粘土中
提取水(溶液)量比值

Table 1 The ratios of soil water extracted from coarse sand, clay sand, tiny sand and sandy clay

$w/\%$	Q_2/Q_1	Q_3/Q_1	Q_4/Q_1
10	43.72	240.88	5490.82
15	30.88	90.85	3625.57
20	13.81	21.69	1515.49
25	4.81	4.03	493.09

2 土壤水样提取量与土壤吸力关系实验

实验试土为粘土,在试筒中安装土壤水取样器,同时安装负压计监测土壤吸力。实验时,土壤水取样器的腔体中的初始负压仍为 -740 mmHg。

实验数据的散点图及相关曲线如图 5 所示。由实验数据建立的土壤水提取量与土壤吸力和土壤基质势的相关方程分别为:

$$Q = -13.071\text{Ln}(s) + 52.183 \quad (8)$$

$$Q = 13.071\text{Ln}(\varphi_m) - 52.183 \quad (9)$$

$F_{\text{计}} = 127.16$, 对于显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $F_{\text{表}}(0.01, 19) = 10.56$ 。

式中 s 为土壤吸力(kPa); φ_m 为土壤基质势(kPa)。

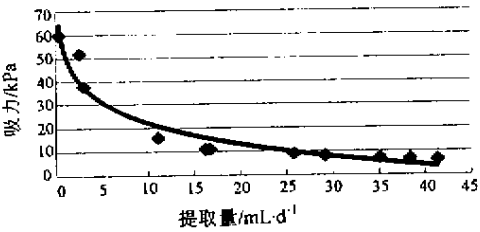


图 5 粘土中土壤水提取量与土壤吸力关系

Fig.5 Relation between soil water extracted and soil suction in clay

从实验看出,土壤水取样器内外的压差是影响土壤水提取量的又一重要因素,土壤水提取量与土壤吸力(或基质势)之间呈对数函数关系。而且土壤水提取量与土壤吸力的相关关系为负相关,与基质势的相关关系为正相关。因此,对于同一种土壤,若土壤水取样器内给定的负压值是固定的,那么当土壤吸力低时,土壤水流入取样器的趋动力就大,土壤水流入取样器的速率相应也高。但是随着土壤吸力的不断升高而趋动力下降,土壤水向土壤水取样器内运移速率显著变小。一旦土壤吸力等于或大于取样器内负压的绝对值时,土壤水取样器不可能再提取到土壤水。实际上,当土壤吸力较高(即含水量较低)时,在土壤水取样过程中,在土壤水进入取样器的同时,部分气体也会进入取样器内部使其负压的

绝对值下降,逐渐使取样器内外的压力趋于平衡,土壤吸力愈高(基质势愈低),这一过程进行的愈快。

3 结语

上述实验研究结果可以看出,在土壤含水量较高时,无论哪一类土壤都具有原位提取土壤水(溶液)的良好条件,可以获得较多的水样量,通常能满足土壤水(溶液)组分的测试需要。因此在灌溉水量较充分、降水较多、潜水平埋较浅等地区都具有原位提取土壤水(溶液)技术的应用条件。在土壤含水量较低条件下提取土壤水(溶液),砂性土壤明显地优于粘性土壤。

由上述实验结果和土壤水取样器的工作原理可知,在土壤水取样器埋设位置,当土壤吸力大于或等于土壤水取样器内负压的绝对值时,土壤水取样器工作完全失效。只有当土壤含水量再增加到可能使土壤吸力低于土壤水取样器内负压的绝对值时,土壤水取样器才能恢复正常工作。因此,土壤水取样器在使用过程中具有间断失效性问题。在实际应用时必须遵循这一规律。

在应用土壤水取样器原位提取土壤水(溶液)的过程中,土壤水取样器内部的负压值并不是固定不变的,即使在土壤含水量较高的条件下,随着渗入土壤水取样器内水(溶液)量的增加,以及水样中部分溶解气在负压条件下的释放,都会使土壤水取样器内负压绝对值降低。特别是在土壤含水量较低时,在土壤水渗入取样器的过程中就会有较多的气体进入土壤水取样器内,使取样器内的负压绝对值持续降低,加速了土壤水取样器内外压力的平衡过程。所以,在许多试验现场使用土壤水取样器时,常常发现前一天将土壤水取样器内抽到一定负压,到第二天土壤水取样器内不再保持负压,也抽不出水(溶液)来。

实际上,有不少情况是取样器在初期取到一定土壤水样,但在取样器内外压力的平衡过程中,当取样器内负压的绝对值低于陶土头周围土壤吸力时,陶土头内外的压力梯度方向发生了变化,已进入取样器内的土壤水又反向从取样器内流向外部土壤中,这是 TQ-1 型土壤水取样器一个明显的局限性。为了使已取得的土壤水(溶液)不再返回土壤中,荆恩春等在开发出 TQ-1 型土壤水取样器的基础上,又开发研制出 TQ-2 型土壤水取样器,它可以使在取样过程前期取得的土壤水保持在土壤水取样器内。同时也解决了大深度(如 20 m 以深)提取土壤水的问题。因此,在土壤含水量较高的场合下应用土壤水取样技术时,使用 TQ-1 型和 TQ-2 型土壤水取样器无明显区别。但在土壤含水量较低或取样位置较深的场合,应选用 TQ-2 型土壤水取样器。

在应用土壤水取样器时,需特别引起重视的一个问题是土壤水取样器系统的密封问题,倘若该系统存在缓慢漏气现象,将使土壤水取样工作失败。实践表明,在许多情况下,人们把土壤水取样器系统存在缓慢漏气造成土壤水取样器工作不正常误认为是因为土壤含水量太低而取不到水样。因此,特别是在土壤水取样器取不到水样时,一定要注意检查土壤水取样器系统的密封性。

由于土壤水取样技术具有原位反复监测土壤水(溶液)变化的优点,因此在环境地质、农业生态、环境保护、水利等研究领域的各种试验现场和实验室模拟实验中具有重要应用价值(王遵亲等,1993)。

参 考 文 献

- 雷志栋等.1988.土壤水动力学.北京:清华大学出版社.
- 荆恩春等.1994.土壤水分通量法实验研究.北京:地震出版社.
- 王遵亲等.1993.中国盐渍土.北京:中国科学技术出版社.

Fundamental Research on Soil Water Sampling Technology

Jing Jihong Han Shuangping

(Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei)

Abstract Soil water sampling technology is of great application significance in the field of environmental geology, especially in such aspects as pollutant migration and accumulation in the unsaturated zone, pollution prediction, prevention and control in shallow groundwater, improvement of saline soil and agroecological study. Based on experimental data, this paper emphatically studies the relationship between soil water extraction amount and soil moisture content in four different kinds of lithology when the soil water sampler is used, the relationship between soil water extraction amount and soil suction in each kind of lithology. The correlation equations are also formulated. Finally, some major factors affecting sampling velocity and soil water - extracting quantity are analyzed.

Key words soil water moisture content soil suction extraction amount sampler