

路基压实程度新检验法

[苏联]B.Γ.菲尔斯托夫 著

金 奇 摘译

人民交通出版社

目 录

对土壤压实程度的要求.....	1
檢驗土壤压实质量的几种方法.....	2
土壤密度輻射测量法的物理基础.....	5
輻射测量法的基本参数.....	8
放射性密度計.....	11
放射性密度計的使用方法.....	13
γ 放射源的选择.....	16
微地形的影响	18
土壤組成的影响.....	21
密度計运行速度的影响	23
安全技术原理.....	26
参考文献.....	29

对土壤压实程度的要求

路基压实必须形成这样的一种土壤结构，使路基在使用中产生的不均匀沉陷不致大于最小容许值。此外，压实还应防止路基在冻融过程中，或在土壤因含水量变化而膨胀的情况下，出现不均匀变形。

为了降低路面厚度，路基应具有由形变模量、弹性模量、摩擦和粘結系数确定的可能的最大承载能力。

最近的研究表明，土壤标准压实法，只与旧路基的密度以及中型压路机的压实程度相适应，因而不能够在任何情况下都使土壤形成应有的结构，以保证路基既具有最大的承载能力，而且在冻结或润湿时又具有对不均匀变形的稳定性。此外，密度标准还必须按土壤种类分别制定，对土壤冻结地区更应如此。

标准压实法虽然具有这些缺点，但是由于缺乏更完善的方法来确定土壤的密度，所以目前还不可能用其他方法代替。

根据最近的研究，不论压实机具和压实工作如何，要形成水稳定性结构，压实工作必须在这样的湿度下进行，即未被水充满的剩余气孔应在3~5%的范围内。在这种条件下，土壤结构是最佳的。剩余气孔的百分数低于此值时，所压实的土壤不能取得这种结构，而高于此值时，则润湿时的必要特性将要降低。由此可见，采用标准压实法还是合算的。

在路堤方面，压实度应不低于标准压实法的0.98~1.00，而在路堑方面，仅在土壤具有水稳定性结构，亦即在非大孔性

沉陷土的情况下才可以較低。

路面的許多破坏現象，都是由于不均匀沉陷所引起的，而这种情况則为路基沿綫土壤的不同密度所决定(图 1)。因此，对于路基压实质量的要求，应以压实的均匀程度为指标，后者則应根据所选择的路面类型来規定。但是，这种压实的均匀程度，由于缺乏可靠的方法，所以沒有得到考虑。

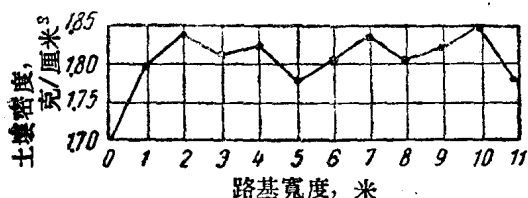


图 1 土壤密度在路基横断面上的分布

檢驗土壤压实質量的几种方法

由于新的先进的施工方法在道路工程实践中的推广使用，要求創立更加完善的檢驗方法。

为了檢驗路基压实质量，必須了解土壤的一些特征，而這些特征的測定，既可在野外測定，也可在試驗室进行。

在試驗室里的試驗，可以得出关于土壤的最全面和最准确的資料。但是，由于这种試驗占用時間很多，而且目前所使用的取样方法易使土壤結構发生变化，以致对于試驗室的試驗結果影响很大，所以一般认为比較簡單的野外試驗法是一种应用方便的好方法。

野外試驗法，目前已获得了最普遍的应用。用这种方法进行測量时所具有的簡便性和快速性，取样过程和得出結果的連貫性，以及往往不用取样就能得出結果的特点，使它已經成了

最受欢迎的方法。

測定土壤特征的所有野外試驗法可以分为两大类:

1) 直接測出土壤强度特征的野外試驗法;

2) 測定土壤状态特征的野外試驗法。

第一类方法能够确定施力板沉陷量与加到板上的荷载之间的关系。但是, 这种关系并不是绝对的, 而是取决于施力板的尺寸和形状, 荷载施加时间和荷载随时间的变化速度。这些数值的标准化, 必将使得出的结果带有一些条件因素。

然而用第二类方法得出的土壤状态特征, 就其数值来说, 却是绝对的。

例如, 容重丝毫不与测量它的液体静态称量法或一般称量法有关; 土壤湿度值也是一样, 不管用恒温法、液体静态法、容量法或其他某种方法来测定, 都是不变的。

測定土壤状态特征的方法, 极为繁多, 最普遍使用的是土壤密度取样测定法, 等粒径砂填孔测定法, 利用稠度曲线的测定法, 利用土壤电阻和土壤热学特征测量方法等。近来, 普遍使用 Н. П. 科瓦略夫的密度-湿度测量仪; 如果不是粘土类土, 这种仪器可以简单而又可靠地测出密度和湿度。

为了拟定和研究土壤密度辐射测量法, 正在进行大量的调查工作。众所周知的密度辐射测量法有两种: 透视法和散射法。

在第一种情况下, 根据通过土层的窄束或宽束 γ 射线的减弱程度, 来判断土壤密度的大小。辐射测量仪和双钎探测仪(图 2) 就是根据这一原理来使用的。

在二种情况下, 通过记录散射的 γ 射线来测量土壤密度。在这种场合, 检验装置是由一个探测器组成, 这就使试验工作大为简化, 因为这样就可以不使用导向装置。测量时, 带

有放射性同位素和放射源的探测器，按照规定深度插入土中。探测器上的放射源和同位素以铅屏蔽板隔开。测量和第一种情况相似，也是在路基上特选的各点、在深达 1.5 米的地方进行的（图 3）。

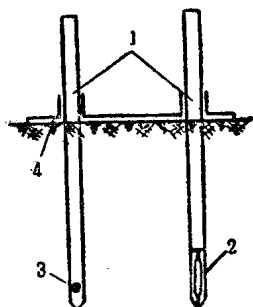


图 2 测量土壤密度的辐射测量叉
1-探测器；2-盖格计数器；3-放射性放射源；4-导向装置

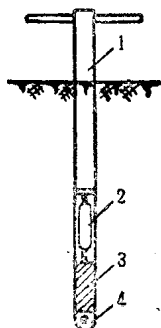


图 3 用散射法测量土壤密度的探测器
1-探测器；2-计数器；3-屏蔽板；4- γ 射线源

推荐的关于检查土构造物密度的方法之所以多种多样，是由于迄今为止还没有一种方法能够满足所规定的要求。在现行方法中，测量只是针对各点进行，而这些点乃是由做这种测量的试验员，按照个人的习惯任意选定的，因而使得出的结果带有某些条件因素，以及这些因素不合理地推广到整个调查路段上。所以对路基压实质量检查方法的基本要求之一，就是压实程度的测量不应局限在个别点上，而应在某一路段的整个长度内进行，使获得的结果能够反映出压实程度的均匀性是否合乎质量要求。

对路基土壤压实质量检查方法所提出的基本要求，可以归结为以下几点。

1. 测量应在不取样的情况下进行。任何取样的测量方法，

都不免发生人为地改变土壤结构的情形，因而不能保证不出现偶然性错误。

2. 进行测量时消耗的劳动量和时间，应该是最少的。

3. 测量结果，应使得不仅能判断出土壤密度的绝对值，而且能判断出土壤在整个面积上的压实均匀性。在一定程度上能够满足这些要求的，是利用散射的 γ 射线和滑行检验器的辐射测量法。这本小册子的编写，正是以这个方法的研究为基础的。

土壤密度辐射测量法的物理基础

放射性物质的特点是原子的动力状态不稳定，它们能在一定的几率下发生衰变。当这些元素的原子由激发的动力状态向基本状态过渡时，便随着产生基本粒子辐射。

为了测定土壤和其他建筑材料的密度，一般是利用具有最大穿透能力而强烈的 γ 射线。 γ 射线一进入物质中，便与这种物质互相作用。由于在实践中测量密度时，一般只利用 γ 辐射能量为0.5~1.5兆电子伏的放射性同位素，所以最可能的相互作用过程，将是康普顿散射。康普顿散射现象，在于放射性放射源发射出来的 γ 量子，与要测量密度的土壤物质电子相互作用。这些粒子的相互作用，一般可视为弹性球体的非中心碰撞，因此可得出一个偏离原始方向为 θ 角和能量比碰撞前较小的 γ 量子，和一个从与之相撞的 γ 量子那里取得部分能量的电子。

关于因康普顿散射而形成的一次散射的 γ 量子的问题，可按基本的方法解出，并把它归结为众所周知的克列英-尼什纳-塔莫关于一个电子和 γ 射线的散射射线束强度的公式：

$$I_0 = I \frac{1}{r^2} r_0^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \left[\frac{1}{[1 + \omega_0(1 - \cos \theta)]^3} + \right.$$

$$+ \frac{\omega_0^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + \omega_0 (1 - \cos \theta)]^4} \Bigg]$$

式中： I_0 ——离散射的电子的距离为 r 时 γ 射线散射綫束的强度；

I —— γ 射线原始綫束的强度；

θ —— γ 量子散射角度；

r_0 ——电子典型半径；

ω_0 —— γ 量子能量的脉冲。

散射的 γ 辐射强度，是起散射作用的物质的电子体积密度（或簡称为密度）的函数。这給根据散射的 γ 辐射强度来判断起散射作用的介质密度，創造了物理前提。

为了在理論上解决关于散射的 γ 辐射强度的問題，曾作过一系列尝试：研究了个别 γ 量子的一定次数的散射几率，研究了跃迁微积分方程式、扩散理論、蒙迪-卡洛法的运用問題，以及射线穿过各层的情况。

研究理論解法时存在一定的困难是，在大多数情况下，算題不可能通过数学上一般的数字法解出，而要使用特別的計算仪器。由于算題的数学复杂性，在本文中不討論各种解法的优缺点，而仅局限于引述以散射过程几率的研究为根据的这一种解法的原理图。

用記錄散射 γ 辐射的方法來測量土壤密度的原理图（图 4），是由装入密封金属小箱中的計数器、 γ 放射源和防止辐射綫直接射到計数器上的鉛屏蔽板組成的。解射到計量

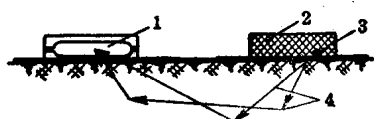


图 4 用記錄散射的 γ 辐射法測量土壤密度的原理图

1—計数器；2—屏蔽板；3— γ 射线放射源；4— γ 量子軌跡

器上的散射的 γ 辐射强度的算题时，我们来研究一下这一过程的几率。它是这样求出的：

$$P = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 P_9 P_{10}$$

式中： P ——计数器记录被相互作用介质电子散射的 γ 量子的一般几率；

P_1 —— γ 量子通过 γ 放射源箱壁的几率；

P_2 —— γ 量子达到土壤微量体积 ΔV_1 的几率；

P_3 ——在单位立体角内， γ 量子按 θ 角散射的几率；

P_4 ——一次散射的 γ 量子能够达到土壤微量体积 ΔV_2 的几率；

P_5 ——土壤微量体积 ΔV_2 的电子使 γ 量子以 θ_2 角散射的几率；

P_6 ——二次散射的 γ 量子能够达到土壤微量体积 ΔV_3 的几率；

P_7 ——土壤微量体积 ΔV_3 的电子使 γ 量子按 θ_3 角散射的几率；

P_8 ——三次散射的 γ 量子能够达到计数器箱壁的几率；

P_9 ——散射的 γ 量子能够透过计数器箱壁的几率；

P_{10} ——计数器记录 γ 量子的几率；

N_1, N_2, N_3 ——分别存在于体积 $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3$ 中的电子数。

由于微量面积而形成的散射的 γ 辐射，以下式表示：

$$dI = PQ$$

式中： Q ——放射源在单位时间内射出的 γ 量子数，而散射的 γ 辐射的整个强度，则可借助于散射介质整个体积的 dI 的积分求得。

这一算题的解出，仅能获得一般的数学公式。由于算题的数学解法困难，所以这个公式在研究大多数实际问题时，适用

性很小。

近来曾力求作出一些簡化和假定，以便使被土壤散射的 γ 輻射强度的算題，能够获得便于实际应用的解法。但是，这样的解法中有很多不准确的地方，在某些情况下，甚至試驗数据与理論結論不能符合。

因此，我們采用了 γ 射綫被土壤散射算題的經驗解法，作为本文的解算基础。由于利用了被散射的 γ 輻射强度与密度的一般关系，在实际测量中所遇到的密度的狹窄范围内接近于直綫，所以今后我們將把这种关系以直綫方程式来表示。

輻射測量法的基本参数

借助 γ 射綫的散射来测量土壤密度的輻射測量法的一些基本参数，諸如作为測量对象的土壤区，計数器与放射源之間的最佳距离等，到目前为止仍然沒有規定出来。因此需要进行实验研究，正是这些实验研究帮助了这些参数的确定。

散射的 γ 射綫强度与使 γ 射綫发生散射的土壤的密度之間的关系，是輻射測量法的基本規律。研究工作是在試驗室放射性密度計模型上进行的。这种模型由一端固定装設盖格計数器的金属槽和被屏蔽的放射强度为5毫克錒当量的同位素 Co^{60} 的放射源組成。在构造上达到了放射源与鉛屏板能够一同沿金属槽自由移动；金属槽上刻有标记，使能把放射源安放在距离計数器20~100厘米的地方，放射源的每次移动間距为3厘米。而装在有机玻璃箱中的土壤，是起散射作用的介质。

为了避免密度的局部变化，土壤是按厚約10厘米的匀层鋪撒的，而为了达到很大的密度，則用木夯分层搗固。整个土层厚度应不小于0.5米。

散射的 γ 輻射强度，利用万能輻射測量儀測量，这种測量儀的信号发生輪与盖格計数器的引綫相連。从每次鋪撒的土层中取样三次来測量土壤的密度。

根据得出的数据为計数器和放射源的每一固定位置繪出土壤容重与被土壤散射的 γ 輻射强度之間的关系曲綫（图5）。这一关系接近于直綫，并可以下列公式示出：

$$I = B - A\gamma$$

式中： I —— 散射的 γ 輻射强度；

γ —— 土壤容重；

A 、 B —— 取决于仪器参数的系数。

从图5中可以看出，随着計数器与放射源之間的距离不同，系数 A 也发生变化，例如，它随着計数器与放射源之間的距离减小而增大。另一方面，系数 A 值在很大程度上决定着輻射測量法的准确度，因为可以认为，此法的准确度与 A 成比例。由此可見，研究人員只要改变 A 值，就能根据所提出的任务来选定儀器的灵敏度。

放射性放射源与計数器之間的距离的选定，决定着土壤密度以輻射測量法測出的精确度。另一方面，安全技术提出了关于仪器中放射性同位素最低数量的附加要求。

如实验数据指出，所記錄的散射的輻射强度，随着計数器与放射源之間距离的增大而显著降低，随着二者之間距离的减小而提高。实际上，在計数器与放射源之間的不同距离下，也

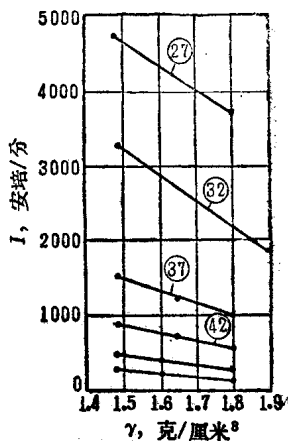


图5 散射的 γ 輻射强度与土壤容重的关系。曲綫上的数字表示計数器与放射源之間的距离

可以使散射的 γ 辐射的测量精确度达到相等的程度，但是，当距离较大时，就须要大大增加放射源能量，这从安全技术方面来考虑，不是在任何时候都是合理的。

使 γ 射线基本线束发生散射的土层厚度，或者说有效地起着散射作用的土层，代表着将以散射的 γ 辐射的记录法来测量的土层厚度。

为了在实验中确定有效地起散射作用的土层值，利用了下列原则。如果土层厚度小于有效散射层，则散射的 γ 辐射强度将随着土层厚度的增大而提高。在土壤厚度达到有效散射层值后，散射的 γ 辐射强度将达到最大值，而且不再随土层的进一步增厚而变化（图6）。

有效散射土层的测定是用放射性密度计模型进行的，它使能在放射源与计数器之间的不同距离下进行测量。

以 ± 0.5 厘米的精确度将土壤按3厘米厚度分层装入箱中并在箱壁上以油漆涂上间距为1厘米的标记后，便对厚3，6，9，……50厘米的土层所散射的 γ 辐射强度进行了测量。

实验表明，有效散射的土层厚度，视放射源与计数器之间的距离以及土壤密度为转移，变动于5~35厘米范围内，

同时，有效区值在距离较大的情况下下降，而在距离较小的情况下则上升。这是由于当计数器与放射源之间的距离小时，幅

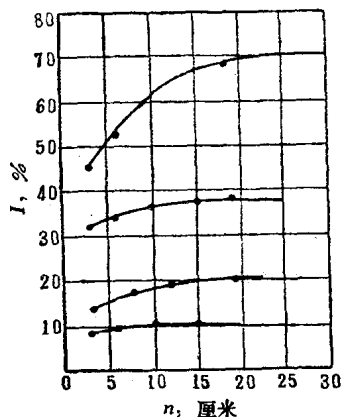


图6 散射的 γ 辐射强度与起散射作用的土层厚度的关系曲线。示出的各个曲线与计数器和放射源之间的各种距离相适应

射的組成中一次散射占优势，也就是說，一次散射的甚至达到相当深处的 γ 量子，也会被計数器記錄下来。当距离大时，一次散射的 γ 量子，在它的行程中会大大地被削弱而不能得到記錄，然而在土壤最上层产生的多次散射的輻射，却組成了計数器所記錄下来的輻射的大部分。

有效散射土层在一定程度上也与起散射作用的材料密度有关。但是，由于土壤密度的变化范围不大，所以这种关系也不大。

放射性密度計

路用放射性密度計，根据它所記錄的散射的 γ 輻射，可以測定土壤的相对压实程度，而判断土壤或道路面层的压实均匀性。土壤总容重借助放射性密度計測定时，可以达到 0.03 克/厘米³ 的精确度。

这种密度計的特点是它不仅能把各点上土壤的密度測量出来，而且能把一个地段上的土壤密度直接測量出来。这使我們能客觀地去判断土壤和其他材料压实程度的均匀性。在这种情况下，測量工作是在放射性密度計传感器以不大于 15 公里/小时运行速度的条件下进行的。

放射性密度計由三部分組成：檢驗器，指示器和电源(图 7)。

檢驗器由 γ 放射源、以鉛板屏蔽的放射能量为 5 微居里的放射性同位素 Co^{60} 以及以 CTC-1 (盖格-米罗) 型电离計数器形成的传感器組成。电离計数器与放大級的第一部分一同固定在金属滑板上。

滑板結構保証 γ 放射源和檢驗器能与土壤表面紧密接触。指針指示器上所表示的被記下来的 γ 輻射讀数，或者抄录下

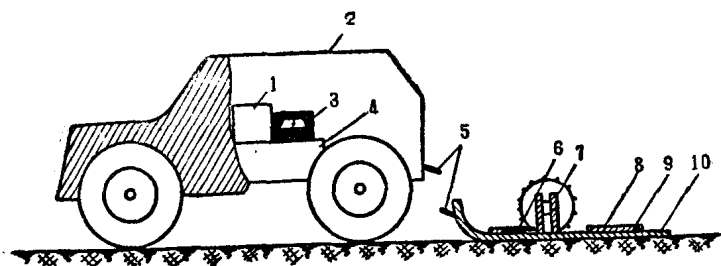


图7 散射法测量土壤密度用的放射性密度计（带有滑行检验器）简图
1-记录用示波器；2-汽车；3- γ 指示器；4-蓄电池；5-钢索和联接电线；
6-计数器；7-转轮和接触式里程记录传感器；8-屏蔽板；9-放射源；10-滑座

来，或者借助示波器予以记录。

利用汽车上的电压为12伏特的蓄电池作为放射性密度计的电源。

放射性密度计的作用方式如下。

落到CTC-1型计数器上的 γ 量子，引起计数器中的气体的电离作用（图8），结果在以6Ж3П电子管装成的放大级栅极上，产生数量与放射强度成正比的负脉冲。放大级的阳极上则形成落到指示器输入端的正脉冲。

由于传到指示器输入端的脉冲形状不明确，也就是说它们的振幅和历时都不相同，此外由于还有数值十分大的负尖头询号，所以在这些尖头询号传递到系统图测量部分之前，必须使上述脉冲经过成形过程。成形线路由用一个6Х2П真空管装成的第一检验器和用2个6Ж3П真空管装成的闭锁多谐振盪器组成。第一检验器负荷上放出纯粹的正脉冲，并把只有一个稳定状态的闭锁多谐振盪器接通。当正脉冲传送到第一真空管栅极时，该真空管就开启，容器5便通过它，沿着线路 R_{10} 和 R_{12} 开始放电，而在多谐振盪器第二真空管的栅极上随着出现负电势并把该真空管闭锁。此时，第二真空管阳极上的电压突然增

加，使容器 C_5 由綫路 R_{14} 和 R_8 充电。

容器 C_5 的充电电流，保証在第一真空管栅极上出現使真空管保持开启状态的正电势。在容器 C_5 充电后，系統图便发生閃絡現象而回到原始状态。系統的閃絡过程，像浪潮那样連續进行，而且只与系統图的参数有关。因此，在第一真空管阳极上形成了振幅和历时都与触动脉冲无关的正角形脉冲，至于它們的值，則与盖格-米罗計数器上的脉冲相适应。

脉冲从成形綫路传到第二檢驗器和积分仪，而积分仪上发出的电压，其数值与照射强度相适应。这一电压传到 γ 指示器的最后級。这种指示器是一种平衡阴极重发器，它的阴极綫路与容量为100微安培的 M-24型指針式微安表相連。

为了調整放射性密度計的灵敏度，备有能使微安表分接的变阻器。为了最后一級的平衡，采用电位計 R_{21} ，而为了使处于工作状态的整个系統图保持平衡，則利用电位計 R_{25} 。

为了記錄放射性密度計的讀数，备有可与記錄仪器振盪器連接的引綫，振盪器借助轉換开关与微安表并連。如需要测量的，不是30厘米厚的上部土层，而是更厚的土层的密度时，設計了一种密度探测器，其作用与放射性密度計相似。在这种情况下，可以測出各点深达1.5米处的密度。

放射性密度計的使用方法

在开始工作之前，应先将仪器按界点法加以校准。在平整的水平面上除去草皮后，准备好长约30~40米、寬約1米的地帶。在这一地段再划分成各具有不变的土壤容重值的几小段（长8~10米）。土层最少40厘米深处的容重值，也應該是不变的。在这种情况下，凡是在使用仪器进行工作时所能遇到的

土壤容重，显然都应当处于在这一地段上所形成的各种容重的范围内。校准用地段准备好后，使装有检验器的滑板沿地段移动，并将指针式指示器刻度盘上的读数记录下来。

调整可变电阻 R_{25} 时，应力求使指示器刻度盘上读数在土壤密度大的地段接近于零；当滑板移动到密度最小的地段时，则改变电阻 R_{19} ，而力求在放射性密度计刻度盘上出现最大读数。此后，使滑板在不同密度的土壤上移动，即可得出所记录的散射的 γ 辐射与土壤密度之间的关系。下面将指出，这种关系可以假定为直线的。

使装有检验装置的滑板竖立，调整具有约 $0.05 \sim 0.01$ 兆电子伏的弱 γ 辐射能力的放射性薄片，并选出薄片对计数器的二个特定位置。当薄片处于这二个位置时，指示器上便能分别表示出最大和最小的读数。薄片的这二个位置，用红色油漆在滑板上标出。可以采用与校准放射性密度计滑板上的检验装置相同的办法来校准放射性探测器。

如以后有必要检验（这种检验最好在每次开始使用放射性密度计工作前都进行）仪器的调整状态时，应将标准薄片按照滑板体上固定下来的位置安放，并进行检查，它是否与以前在指示器刻度盘上得出的读数相符合。如果界点不相重合，则通过调整电阻 R_{25} ，力求指示器刻度盘上出现相应的读数。

密度计滑板经过调整后，放到欲调查的土壤表面上，并用钢索使与牵引汽车相连（图9）。检验装置借助三芯屏蔽导线，与指示器以及设于汽车车箱中作为仪器电源的蓄电池相接。

在进行测量时，汽车以不大于 15 公里/小时的速度向前行驶，而坐在汽车车箱中的测量员，则注视着指示器的读数，并把它们记入观察簿中。如装有自动记录器时，则示波器的感光带上会得出关于土壤密度的记录（图10）。这时，测量员的工作



图9 以放射性密度计测量土壤密度

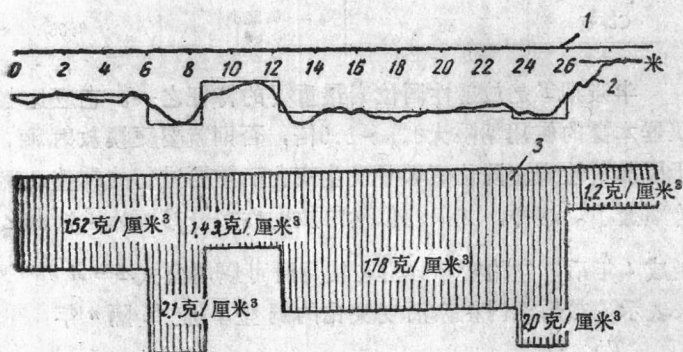


图10 以放射性密度计记录的土壤密度

1-里程标记; 2-放射性密度计的记录; 3-用一般方法测得的密度数据