

土壤：地球的皮肤

撰文/张甘霖、杨顺华（中国科学院南京土壤研究所）

电影《火星救援》中，主人公马克·沃特尼在执行任务时被误认为无法生还而被遗留在火星，成了太空鲁滨逊。幸运的是，马克是植物学家，懂得土壤之于植物的意义，火星土壤成了他在火星生存下来的救星。

不用去细究马克在火星种土豆的可能性，毕竟那是科幻电影。也许，只有到了火星那样的环境，才能更切身体会土壤的重要性。在很多人眼中，土壤无非就是我们常说的泥土或者尘埃，它是大自然里一种理所当然的存在，甚至是一文不值的“粪土”。在中文语境中“土”是廉价和落后的代名词，所以形容奢侈是“挥金如土”，形容落后是“土得掉渣”；在西方也是如此，soil 就是 dirt 的同义词。不过，与此同时，土壤也是我们称赞的对象，“万物土中生”一语道破土的重要。

事实上，土壤就像空气、水和阳光一样，在维系人类生存方面起着不可替代的作用。“百谷草木丽乎土”（《易·离》），除了提供食物之外，土壤还有许许多多的功能。土壤可以缓冲污染物，保护环境；可以将产生温室气体的碳固存在土壤之中，成为“碳库”；可以作为建筑物的支撑材料；也可以作为蚯蚓等土壤动物以及微生物的安身之所，是陆地表层系统中最大的生物多样性保存场所和基因库；土壤还可以提供相对稳定的封闭环境，保存自然文化遗产；另外，有些土壤还是珍贵的旅游资源。离开了土壤的哺育，人类文明难以为继。



“竹林七贤与荣启期”模印拼镶砖画（南京博物院），
而意大利语中“砖”为 Terra-cotta，意为“烧过的泥土”

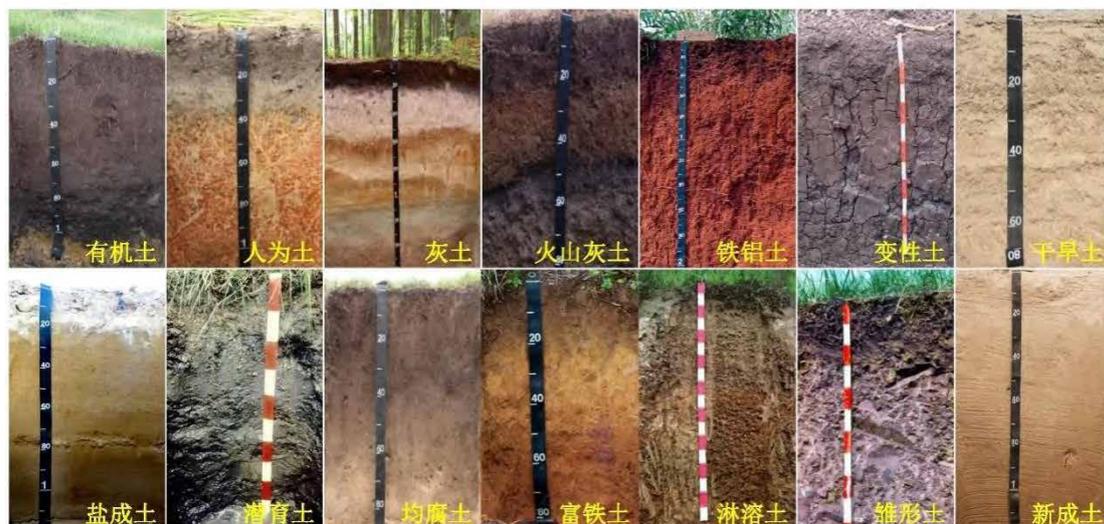
土壤之于地球，正如皮肤之于人体。毫无疑问，皮肤是动物的最大器官，更是抵御外来伤害的首要屏障，几乎没有人怀疑皮肤对于动物生存的重要性。其实，土壤作为陈铺在地球表面的一层松散物质，就像皮肤一样维持着陆地生命的存续。20 世纪 60 年代，苏联土壤学家称

土壤为土被；根据希腊语中“Geo（地球）”和“Derma（皮肤）”的含义，1967年创刊的国际土壤学会杂志被命名为《Geoderma》，而我国早在唐代就把土壤称为“地皮”。可见，把土壤比作地球的皮肤，是很多国家的共识。

形形色色的土壤

今年夏天，笔者的朋友圈总被彩虹刷屏，足见人们对彩虹的喜爱。但我们可曾想过，脚下的土壤实际上也有着不逊于彩虹的多彩颜色。

形形色色的土壤



北京天安门西侧的中山公园，槐柏合抱，古木虬枝，花繁叶茂，园内有个社稷坛引得游人驻足观望。社稷坛为明清两代祭祀社、稷神祇的祭坛，因坛中陈铺青、红、白、黑、黄的五色土壤，故又名“五色土”。据记载，明朝时，五色土由全国各地纳贡而来，寓意“普天之下，莫非王土”。

那么，五色土的陈设布局又有什么讲究呢？

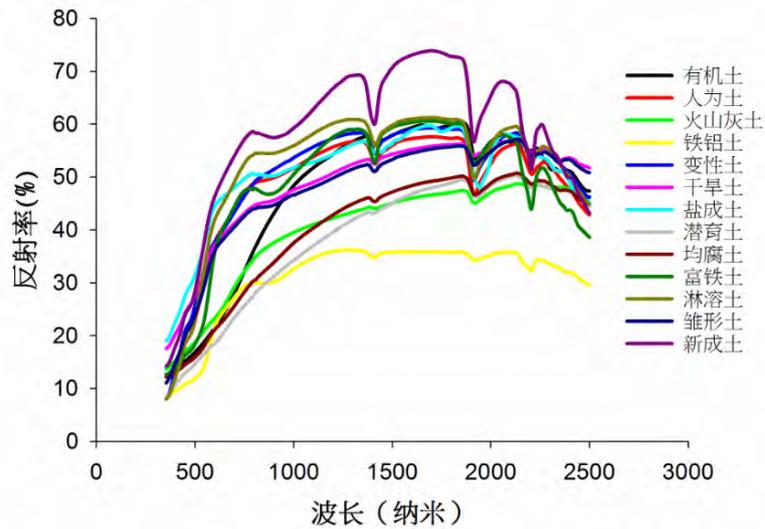
原来，东青、南红、西白、北黑、中黄的空间格局大体反映了我国土壤在这五个方位上的真实情况。我国东临大海，又是很多江河的入海口，因此土壤长期处于淹水状态之下，其中的氧化铁（ Fe_2O_3 ）被还原成氧化亚铁（ FeO ）而呈灰绿色，是为青土。南方闷热潮湿而多雨，大量易溶于水的土壤物质受雨水冲刷而流失，最终剩下氧化铁和氧化铝（ Al_2O_3 ），因而呈现红色。西部气候干旱，土壤以盐土和碱土为主，这类土壤中富含碳酸钙、石膏等白色矿物质，加上可溶性盐在土壤表层聚集，所以变成了白色。东北地区气候湿润而寒冷，黑色的腐殖质在土壤中大量积累，且降解缓慢，长年累月黑色不断加深，因此称作黑土。黄土则主要分布于我国的黄土高原，黄土颗粒细腻，适宜耕作，其所在的黄河流域正是中华文明的发祥地。就这样，各色土壤或占山为王，或蛰伏浅滩，或寄情塞外，又或绵亘晴川，阅尽春花秋月，看遍草长莺飞，纷纷割据一方，最终形成了我们脚下这块神奇的土地。而五色土就是我国丰富多彩的土壤空间分布格局的一个缩影。



北京中山公园社稷坛中的五色土

实际上，土壤有着“五色”之外更为丰富的颜色变化，作为表征土壤物质组成差异的重要指标，土壤颜色在实际中也有着重要的应用价值。传统意义上，人眼观察识别土壤信息主要局限在可见光范围。比如，土壤学者常用 Munsell 比色法（包括色调、明度、彩度 3 个参数，用数字来精确描述各种色彩）来表示土壤颜色，由于土壤颜色一定程度上反映了土壤的物质组成，土壤学者甚至在野外调查过程中就能做出土壤物质组成、土壤性质及其主要特征的充分肯定的判断。

近年来，传感器技术的发展打开了我们观察土壤的“第三只眼”，让我们得以在更宽广的维度（如 X 射线、可见-近红外光谱、微波等）看见更多的土壤信息。形态各异的土壤光谱曲线，就如同土壤独一无二的“指纹”信息，蕴藏了土壤属性的多重密码，通过光谱解译，可以探析土壤理化性质（颜色、质地）、土壤肥力（有机质、氮磷钾）、土壤矿物组成、土壤类型等。此外，赤铁矿、针铁矿和纤铁矿等是自然界中重要的致色物质和颜料，这些物质忠实地记录了土壤形成的气候环境。利用土壤颜色作为气候变化代用指标来重建古气候也成了当前土壤学的研究热点之一。



不同类型土壤的可见—近红外漫反射光谱“指纹”

自然界中，土壤不论在颜色，还是在物质组成上都是千差万别的，正如“世界上没有两片完全相同的叶子”，世界上也没有两块完全相同的土壤。那么，这些“长相各异、内在不同”的土壤到底是如何形成的呢？

土壤是如何形成的？

土壤的形成源自地壳表层岩石的风化。风化壳的表层就是形成土壤的物质基础——成土母质。暴露在地表的成土母质不仅仍然受风化作用的影响，还要与周围的环境（包括大气、水、植物）相互作用，发生一系列的物质和能量交换，才能形成具有肥力特征的土壤。这就是土壤的形成过程，也叫成土过程。19世纪末，俄罗斯著名土壤学家B. B. 道库恰耶夫创立了土壤发生学说，首次提出土壤是母质、气候、生物、地形和时间五大成土因素的产物。

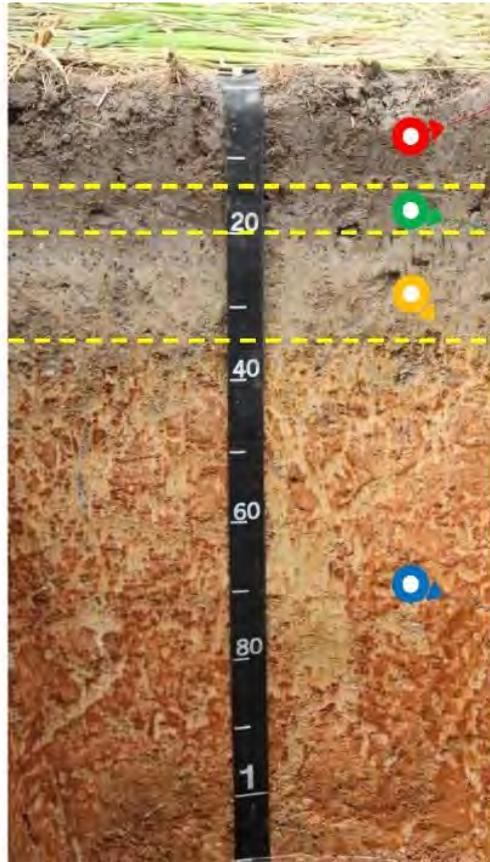
20世纪40年代，美国土壤学家H. Jenny发展了道库恰耶夫的成土因素学说，提出了著名的土壤形成方程式： $S=f(c, l, o, r, p, t, \dots)$ 。式中： S 、 c 、 l 、 o 、 r 、 p 、 t 分别指土壤、气候、生物、地形、母质和时间，省略号则代表尚未确定的其他次要因素。该方程以函数形式归纳和简化了各个成土因素之间复杂的相互关系，成为理解土壤形成最重要的概念模型。



玄武岩上发育的铁铝土景观（广东徐闻），土壤的“前世今生”在此清晰可见：基岩、风化物和土壤层次依次排列

母质为土壤的发生发育提供最初的物质来源，是构成土壤矿物质、提供植物所需养分的物质基础。气候通过温度和降水全面影响成土过程中的物理、化学和生物作用的强度和方向。生物（包括植物、动物和微生物）在自身的生命活动过程中与土壤发生物质和能量交换，改变了土壤结构和孔隙状况，使土壤形成腐殖质层从而具有肥力特征。地形的作用又会进一步影响上述成土因素对土壤的作用，以及利用重力对地表的物质和能量进行重新分配。当然，任何因素对成土过程的影响都与时间有关，作用程度随时间的延长而加强。

值得一提的是，岩石风化并非成土母质的唯一来源，无处不在的大气降尘也可为土壤发育提供新鲜底物，甚至从根本上改变原本自上而下的成土模式和风化速率，对一些老年土壤和弱风化地区的土壤尤其如此。而在当今我们生存的人类世（Anthropocene），人类活动通过调节和改变其他成土因素来控制土壤的发育程度及方向，对土壤发生演化起着不可忽视的作用，成为五大成土因素外最重要的影响因素。例如，水稻土就是长期人为耕作活动的结果。



耕作层

养分多，根系密，由原土壤表层经长期灌溉耕作而成，富含有机质

犁底层

紧实，长期耕作中受到农机具的压实而成，可阻滞水分下渗，具有保水保肥的功效

渗育层

土色较浅，多呈灰色，由季节性灌溉导致土壤铁还原并随下渗水淋失所致

水耕氧化还原层

水耕条件下，上层淋失的铁锰氧化淀积形成棕色铁锈斑纹和铁锰结核等，有时还残有原有母质的铁氧化物，漂白部分指示了非均质的还原淋失过程

水稻土：土壤形态和性质记录着人为作用改变土壤水分状况和物质循环的过程，这些过程影响土壤发育强度和方向

土壤形成到底有多快？

这是一个很难回答的问题，因为不同环境下土壤的形成速率差异可达几个数量级。已知最快的土壤形成速率出现在新西兰的南阿尔卑斯山，速率为 2.5 毫米/年。不过，据估算地球表面土壤的平均形成速率约为 0.056 毫米/年。据报道，目前我国皖南丘陵地区花岗岩上发育的土壤形成速率约为 0.066 毫米/年，也就是说，形成 1 米厚的土壤，大概需要 15000 年，如果考虑土壤的侵蚀，形成的时间还会更长。我们常见的土壤，其形成一般都在万年以上，因而有“千年龟万年土”的说法。

从土壤形成的绝对年龄，即在当地新的风化层或新的母质上开始发育时起到目前所经历的时间来看，地球上最古老、绝对年龄最大的土壤可能存在于非洲和澳大利亚，那里一些出露岩石（裸露在地表上的岩石）的年龄至少可追溯至 5 亿年前，而最年轻、绝对年龄最小的土壤一般多发育于新近沉积物之上。

依据流域元素质量平衡法估算的不同地区土壤平均形成速率

| | 位置 | 基岩 | 面积 | 年均温 | 年均降雨量 | 土壤形成速率 |
|-------|----------------|-------|------|-----|-------|--------|
| | | | 平方千米 | 摄氏度 | 毫米/年 | 毫米/年 |
| 非洲 | Juliasdale | 花岗岩 | 0.91 | 13 | 1220 | 0.028 |
| | Rusape | 花岗岩 | 7.33 | 17 | 922 | 0.010 |
| 英国 | EG | 花岗岩 | 4.57 | 8 | 2000 | 0.046 |
| 日本 | Iu-river | 花岗岩 | 0.97 | 14 | 1957 | 0.076 |
| | Iu-river | 火成碎屑岩 | 1.27 | 14 | 1957 | 0.264 |
| | Iu-river | 安山岩 | 0.26 | 14 | 1957 | 0.042 |
| 印度尼西亚 | G. Gadut | 火山灰 | - | 27 | 4764 | 0.125 |
| 美国 | Hubbard Brook | 混合岩 | 31.6 | 5 | 1295 | 0.006 |
| 地壳 | Earth's crust | 混合岩 | - | - | 740 | 0.046 |
| 中国 | Southern Anhui | 花岗岩 | 3.59 | 15 | 1503 | 0.066 |

显然，由于成土因素的组合千差万别，不同地区的成土速率也表现得参差不齐。例如，地处热带地区的海南岛，其玄武岩红色风化壳可深达 30~40 米，形成速度也很快，而在寒冷的青藏高原土层只有数厘米，形成过程极其缓慢。通常，基性岩母质发育的土壤，由于含角闪石、辉石、黑云母等抗风化力弱的深色矿物较多，比酸性岩发育的土壤（含石英、正长石、白云母等抗风化强的浅色矿物较多）有更快的成土速率；温暖湿润的气候、发育茂盛的植被、疏松堆积的母质以及排水条件优良的地形更有利于土壤的快速发育。

土壤类型与适宜性

一般说来，作物能否生长，气候是先决条件；而作物能否长好，土壤及其管理则是关键。很久之前，由于人们改造自然的能力非常有限，只能选择在水草丰茂的自然土壤上耕作。比如，在我国的黄土高原，由于土壤颗粒非常细腻，便于耕作，因此我们的祖先在很多年前就来到这里繁衍生息。随着人口规模的不断扩大，人们需要走出原本的“舒适区”，开垦更多的土地来种植庄稼以满足日益膨胀的粮食需求。

土壤性质千差万别，反映在可利用性和生产能力上也有差异。正因为土壤的多样性，人们根据“因土种植，因土施肥，因地制宜”的生产原则，在长期的农业实践中，培育出许许多多的名特优产品，也就是我们俗称的特产。这是土壤学的分支学科“土宜学”研究的范畴。

“凡草木之道，各有谷造”，早在二千多年前，我国就有关于作物的土壤适宜性，也就是土宜学的朴素探讨。土壤以其特有的“土宜”特性，在不同生态条件下，生产了各种驰名中外的名特优农产品：如热带铁铝土上的咖啡、可可、胡椒和腰果等；亚热带富铝土上的柑桔和茶叶，特别是柑桔类的沙田柚、南丰蜜桔、潮州椪柑，茶叶中的乌龙茶、普洱茶和龙井茶；温带淋溶土上的肥城桃、莱阳梨、天津鸭梨和烟台苹果等；漠境干旱土上的长绒棉、吐鲁番葡萄、哈密瓜和库尔勒香梨。天然药物方面也有与土壤相联系的特定产地，如黄连以川、贵为佳，枸杞以甘、宁为优，红花以西藏为最，三七云、贵居上。

土壤资源亟需人类的关注与呵护

土壤资源如此宝贵，但根据联合国 2015 年发布的《世界土壤资源状况》报告，世界范围内土壤功能正面临土壤侵蚀、土壤有机质丧失、养分不平衡、土壤酸化、土壤污染、水涝、土壤板结、地表硬化、土壤盐渍化和土壤生物多样性丧失等十大威胁。其中，仅土壤侵蚀，每年就会造成 250~400 亿吨表土流失，导致作物减产、土壤固碳能力下降、养分和水分明显减少。据统计，每年因侵蚀所造成的谷物损失可高达 760 万吨。



水土流失造成河道淤塞和耕地损失

古人云：皮之不存，毛将焉附？生产性土壤的进一步流失将严重威胁粮食生产和安全，加剧粮价波动，有可能使数百万人陷入饥饿和贫穷。然而，人们在仰望星空探索未知的时候，常常忽视了自己脚下所踏立的土壤。文艺复兴巨擘达·芬奇就曾直言“我们对自己脚下土壤的了解，远不及对浩瀚的天体运动了解得多”。作为地球皮肤的土壤，需要人们的关注和呵护。

仰望恒河沙数的星空，有无数像火星这样的地外星体表面也覆盖着土壤，但目前只有地球土壤是已知唯一富含生命的。事实上，火星土壤只有 400 多种矿物，而地球土壤的矿物类型多达 4000 多种，远比火星复杂。土壤，这层地球的皮肤是维系地球生命的保障，保护这薄薄的“皮肤”就是保护我们自己。联合国大会将 2015 年确定为“国际土壤年”，国际土壤科学联合会自 2002 年起将每年的 12 月 5 日确定为“世界土壤日”，世界各地会举行各种活动宣传土壤的重要性，提醒人们爱护脚下的土壤。。

本文引用的数据和图表来自国家科技部科技基础性工作专项“我国土系调查与《中国土系志》编制”（编号：2008FY110600，2014FY110200）和国家自然科学基金项目（编号：41130530，91325301，41571130051，40601040）成果。