

土壤重金属 污染与控制

TURANGZHONGJINSHUWURANYUKONGZHI



范拴喜 编著



中国环境科学出版社

土壤重金属污染与控制

范拴喜 编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤重金属污染与控制/范拴喜编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2011.11

ISBN 978-7-5111-0721-3

I. ①土… II. ①范… III. ①土壤污染: 重金属污染—土壤污染控制 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 194489 号

责任编辑 刘 璐

责任校对 尹 芳

封面设计 马 晓

出版发行 中国环境科学出版社

(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

联系电话: 010-67112765 (总编室)

发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂

经 销 各地新华书店

版 次 2011 年 11 月第 1 版

印 次 2011 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 16.5

字 数 380 千字

定 价 42.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序 言

土壤与岩石圈、生物圈、大气圈和水圈相连接，组成一个开放的系统。土壤为人类和动物提供了必需的食物和原材料，同时也与外界各环境要素之间进行着物质与能量的交换。因此，土壤是人类赖以生存的物质基础和生产资料，是人类以及社会发展的基本生态环境条件，是最珍贵的自然资源。土壤一旦被污染，将会对人类造成极大的危害，因为它不仅直接导致粮食减产，而且通过食物链危害人类的健康，同时其中的污染物也会污染地下水，且随地下水迁移扩散到人类生活的其他环境中。因此，土壤污染问题的研究，对控制土壤整体环境、改善环境质量具有十分重要的意义。

随着社会工业化的发展，土壤污染问题日益严重，尤其近几年土壤重金属污染问题突出，已经引起世界的重视。土壤重金属污染可追溯到 20 世纪 60 年代，日本的“骨痛病”和“水俣病”，当时被列入震惊世界的八大公害事件，主要是土壤中重金属镉和汞通过食物链进入人体后引起的中毒症状。近几年，土壤重金属中毒事件在我国频频发生，据环境保护部统计，2009 年环保部接报的就有 12 起重金属、类金属污染事件，致使 4 035 人血铅超标，182 人镉超标，引发 32 起群体事件。湖南浏阳镉中毒事件、陕西凤翔血铅超标事件、湖南砷中毒事件和贵州汞中毒事件等，都演化为威胁和谐社会建设的公共事件，而目前我国这样的事件仍在持续发生。因此，土壤重金属污染、污染状况、监测、风险评估、控制、修复等方面的研究迫在眉睫。

本书通过对土壤的概念、结构、理化性质，对土壤重金属污染来源和基本特征，土壤重金属对动植物的污染危害，土壤重金属的检测技术和手段，土壤背景值、环境容量及质量，土壤重金属的评价方法以及修复手段等内容介绍，希望读者掌握土壤及其重金属污染的基础知识，提高重金属污染的防范意识，了解土壤重金属污染的监测技术和手段、评价方法和修复手段。同时，本书为我国土壤重金属污染控制提供了理论基础。

本书可供土壤重金属监测,土壤重金属污染研究、评价、修复、控制、管理等领域的从业人员和研究人员参考,也可作为大专院校环境科学、环境工程、生态学、土地管理、土壤学等师生的参考用书。

本书受陕西省教育厅 2010 年科研专项项目(2010JK406)和宝鸡文理学院重点项目(ZK0920)的共同资助。本书的出版得到宝鸡文理学院自然地理学陕西省重点学科的全额资助。

由于作者水平有限,加之客观条件所限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

范拴喜

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 土壤概论	1
1.1 土壤的概念	1
1.2 土壤的组成	1
1.3 土壤剖面结构及形成	8
1.4 土壤的分布规律	11
1.5 土壤性质	13
1.6 人类与土壤的关系	26
第 2 章 土壤重金属污染	28
2.1 概述	28
2.2 土壤重金属污染来源	29
2.3 重金属在土壤中的分布与特点	32
2.4 土壤重金属的存在形态	34
2.5 土壤重金属的有效性及其提取方法	35
2.6 土壤中重金属有效性影响因素	38
2.7 重金属在土壤中的迁移转化	42
2.8 影响土壤重金属迁移转化的因素	44
第 3 章 土壤重金属元素的危害	50
3.1 概述	50
3.2 铅	51
3.3 镉	56
3.4 铬	62
3.5 汞	67
3.6 砷	72
3.7 铜	78
3.8 锌	84
3.9 重金属的复合污染	88

第 4 章 土壤重金属污染检测技术	93
4.1 土壤样品的采集	93
4.2 土壤样品加工与管理	99
4.3 土壤样品的分解	101
4.4 土壤中重金属的检测方法	109
第 5 章 土壤背景值、环境容量及质量	140
5.1 土壤环境背景值	140
5.2 土壤环境质量	148
5.3 土壤环境容量	149
第 6 章 土壤重金属污染评价方法	154
6.1 概述	154
6.2 单因子指数法	154
6.3 几何均值综合评价模式	155
6.4 综合指数法	156
6.5 内梅罗综合污染指数法	158
6.6 污染负荷指数法	159
6.7 地积累指数法	160
6.8 沉积物富集系数法	161
6.9 潜在生态危害指数法	163
6.10 模糊数学法	165
6.11 模糊识别模型	170
6.12 灰色聚类法	172
6.13 改性灰色聚类法	174
6.14 灰色模糊聚类分析	175
6.15 灰色关联分析法	176
6.16 基于 GIS 的地统计学评价法	177
6.17 基于神经网络模型评价方法	182
6.18 健康风险评价方法	186
6.19 环境风险评价法	191
6.20 结语	191
第 7 章 土壤重金属污染修复	192
7.1 概述	192
7.2 工程措施	192
7.3 热解吸法	193
7.4 玻璃化技术	194
7.5 电动修复	195

7.6 电热修复/电磁法修复.....	200
7.7 土壤淋洗.....	200
7.8 土壤固化技术.....	205
7.9 有机质改良法.....	207
7.10 重金属拮抗作用.....	208
7.11 微生物修复技术.....	208
7.12 植物修复技术.....	213
7.13 农业生态修复.....	224
7.14 联合修复技术.....	224
附 录.....	226
参考文献.....	250

第1章 土壤概论

1.1 土壤的概念

土壤是位于地球陆地表层，具有肥力的、能够生长植物的疏松多孔物质层。其中：“地球陆地表层”是指土壤的位置；“疏松”是指土壤的物理状态，与坚硬的岩石区分开；“生长植物”是土壤的功能，土壤之所以能生长绿色植物，是由于它具有肥力。土壤与岩石圈、生物圈、大气圈和水圈相连接，组成一个开放的系统，土壤不仅与系统内各组成、结构和土层之间，也与外界各环境要素之间进行着物质与能量的交换。土壤是地球吸收和转化太阳能的重要的过程媒介与物质载体，其最大的功能就是能让不同的植物立足，使植物根系在其中伸展，从其中吸收植物生长所需要的养分、水分及氧气，土壤与植物是陆地生态系统食物链的主要环节，土壤环境质量决定了植物产品的质量与数量。土壤是人类赖以生存的物质基础和生产资料，是不可代替的自然资源，也是人类以及社会发展的基本生态环境条件。土壤能够生产人类生活所需要食物（包括植物及动物及纤维）。植物生长在土壤中，转化太阳能为生物化学能，并吸取土壤中的水分及营养而成长。动物的食物也直接或间接来自植物，因此人类生活基本上不能离开土壤。因此，土壤是介于生物界与非生物界之间的中心链环，也是人类环境各组成要素中物质与能量交换的枢纽。土壤具有不断供应、协调植物生长发育必需的水分、养分、空气和热量的能力，即土壤肥力，土壤具有肥力是土壤区别于其他自然体的最基本的特征，土壤肥力是在土壤长期发生、发展过程中，多种物质和因子共同作用下逐渐形成的，土壤是一个独特的、复杂的自然体。总之，从环境科学的角度评价，土壤不仅是一种资源，也是人类生存环境的重要组成要素，土壤可具有五大基本功能：土壤可提供植物生长的介质；土壤可作为生物的栖息地；土壤是各种养分与有机废弃物转变的场所；提供水资源并净化水质；土壤可作为工程施工的基地。

土壤与土地是两个不同的概念，土壤是地球表面上的附着物，人力可以搬动土壤；土地是人类活动、进行生产和朝夕相处的自然客体，它是人类栖息的场所，土地是非人力可以搬动的。从发生学角度来讲，气候、地貌、母质、生物等是土壤形成的因子，土壤只是反映了这些因素的综合作用，并且只是这些因素相互作用的产物。土地则是在一定地段内把全部自然因素（包括土壤在内）作为它本身的组成部分，并通过这些成分的相互作用构成一个整体，从而具有综合自然特征。土壤是组成土地的一个重要成分。

1.2 土壤的组成

土壤是由固相（包括矿物质、有机质及活的生物有机体）、液相（土壤水分和溶液）和气相（土壤空气）等组成的多相分散系统，其组成如图 1-1 所示。

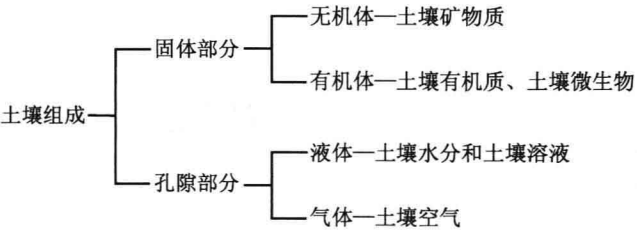


图 1-1 土壤组成

固相包括土壤矿物质和有机质，占土壤总重量的 90%~95%，占土壤体积的 50%左右。液相指土壤水分及所含的可溶物，也称土壤溶液，占土壤体积的 20%~30%。气相指土壤空气，占土壤体积的 20%~30%。土壤中还有数量众多的细菌和微生物。因此，土壤是一个以固相为主的不均质多相体系，构成了一个矛盾的统一体，它们互相联系，互相制约，为作物提供必需的生活条件，是土壤肥力的物质基础，如图 1-2 所示。土壤中的矿物质、有机质和微生物与土壤的污染化学行为最为密切相关。

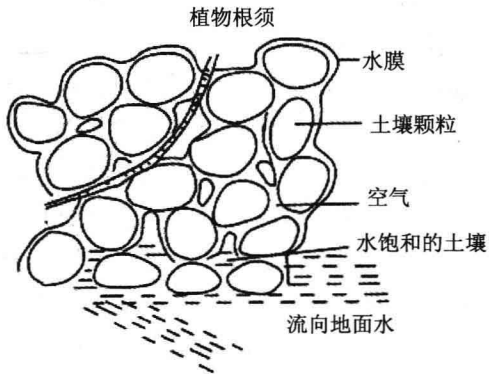


图 1-2 土壤中固相、液相、气相结构示意图

1.2.1 土壤的矿物质

土壤矿物质是土壤的主要组成物质，构成了土壤的“骨骼”，占土壤固体物质的 90%以上，它来源于岩石的物理风化和化学风化作用，其大小和组成复杂多变，土壤矿物质按其成因类型可分为原生矿物质和次生矿物质。

(1) 土壤原生矿物质

原生矿物质是指岩石只经过物理风化的矿物质，其化学成分和结晶构造未发生大的改变，仍然保持母岩中的原始部分。原生矿物质的颗粒粒径较大，如土壤中的砂粒和粉粒，晶格坚定坚实，不透水也不膨胀。一般土壤中常见的原生矿物质有四大类：

① 硅酸盐类矿物质

常见的硅酸盐类矿物质包括长石类矿物、云母类矿物、橄榄石、辉石和角闪石类矿物等。它们都不稳定，易于风化，因此在土壤中残留量较低。此类矿物质在风化过程中可释放出 K、Na、Ca、Fe、Mg 及 Al 等植物营养元素，同时形成次生矿物质。

② 氧化物类矿物

氧化物类矿物包括石英(SiO_2)、赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、金红石(TiO_2)等。该类矿物质及其稳定,不易风化。其中石英是土壤中分布最广的一种矿物质,是土壤中砂粒的主要成分。

③ 硫化物类

土壤中常见的有铁的硫化物矿物,如黄铁矿和白铁矿,黄铁矿和白铁矿都属于硫化物矿物,但它们的晶体结构不一样,所以外观也不一样。白铁矿的颜色为锡白色和青铜黄色,跟黄铁矿的黄铜色不太一样。白铁矿与黄铁矿相同,二者属于同质二象复体,为斜方晶系,晶体常呈板状产出,分子式均为 FeS_2 。硫化物类矿极易风化,是土壤中硫的主要来源。

④ 磷酸盐类

土壤中分布最广的磷酸盐类矿物质是磷石灰,包括氟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$ 和氯磷灰石 $[\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{Cl}]$ 两种,其次是磷酸铁、铝及其他磷的化合物。磷酸盐类矿物质是土壤中无机磷的主要来源。

⑤ 特别稳定的原始矿物质

主要有锆石、电气石、绿帘石、蓝晶石、石榴子石等硅酸盐矿物,它们在土壤中分布不广泛,数量少,但具有高度稳定性,能长期留在土壤中。

(2) 土壤次生矿物质

土壤中的次生矿物质主要是由岩石经化学风化过程和成土过程形成的新的矿物质,其化学组成和晶体结构与风化前的原生矿物质有所不同。次生矿物质是土壤黏粒和无机胶体的重要组成部分,其大多是土壤矿物中最细小的部分(粒径 $<0.001\text{mm}$),具有胶体性质,它影响土壤许多重要的物理、化学性质。土壤中次生矿物质的种类很多,据其性质与结构可分为三类:简单盐类、三氧化物类、次生铝硅酸盐类。

① 简单盐类

属水溶性盐,易淋溶流失,一般土壤中较少,多存在于盐渍土中。如方解石(CaCO_3)、白云石 $[\text{Ca} \cdot \text{Mg}(\text{CO}_3)_2]$ 、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、泻盐($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、水氯镁石($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)等。是原生矿物经化学风化后的最终产物,结晶构造也较简单,常见于干旱和半干旱地区的土壤中。

② 三氧化物类

三氧化物类是土壤矿物质中最细小部分,粒径小于 $0.25\mu\text{m}$,称为次生黏土矿物。如针铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、褐铁矿($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、三水铝石($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$),是硅酸盐矿物彻底风化后产物,结晶构造较简单,常见于湿热的热带和亚热带地区土壤中。

③ 次生铝硅酸盐类

次生铝硅酸盐类矿物质是土壤矿物质中细小部分,粒径小于 $0.25\mu\text{m}$ 。土壤很多重要物理、化学过程和性质都和次生铝硅酸盐种类和数量有关。这类矿物在土壤中普遍存在,种类很多,是由长石等原生硅酸盐矿物风化后形成。是构成土壤的主要成分,故又称为黏土矿物。由于母岩和环境条件的不同,使岩石风化处在不同的阶段,在不同的风化阶段所形成的次生黏土矿物的种类和数量也不同,但其最终产物都是铁铝氧化物。例如,在干旱和半干旱的气候条件下,风化程度较低,处于脱盐基初期阶段,主要形成伊利石;在温暖湿润或半湿润的气候条件下,脱盐基作用增强,多形成蒙脱石;在湿热气候条件下,原生

矿物迅速脱盐基、脱硅，主要形成高岭石。在进一步脱硅时，矿物质彻底分解，造成铁铝氧化物的富集（红土化作用）。土壤中的次生硅酸盐类可分为 3 类：水化云母类、蒙脱石类和高岭土类。

水化云母类，包括水化云母（水云母）和伊利石等。水化云母类属于 2:1 构型，相邻晶层之间有 K^+ 存在，由于 K^+ 的引力使晶层之间结合较紧密，且遇水时膨胀受到限制，风化程度较低，一般土壤中均有分布，但以温带干旱地区土壤中含量最多。其颗粒直径小于 $2\mu m$ ，膨胀性较小，具有较高的阳离子代换量，并富含钾（ K_2O 4%~7%）。

蒙脱石类，包括蒙脱石、拜来石、绿泥石等。其共同特征是结构晶架，均由两个硅氧片夹一个铝片重叠而成一个晶体单元，故同属于 2:1 型矿物，并由这些晶体单元连接成层，重叠而成。但晶层之间没有氢键、联系力弱，遇水易膨胀，故具有巨大的内表面，而这类矿物质又普遍具有同晶替代现象，带有相当多的负电荷，因而具有较强的吸附阳离子的能力，所以蒙脱土类具有很强的吸水力（所吸收的水分植物难以利用）、可塑性、胀缩性、代换性（阳离子代换量极高）。蒙脱石类在温带干旱地区的土壤中含量较高，其颗粒直径小于 $1\mu m$ 。

高岭土类，包括高岭土、埃洛石等，其共同特征是结构晶架均由一个硅氧片夹一个铝片重叠而成一个晶体单元，故同属于 1:1 型矿物，高岭土类矿物就是由许多这种晶体单元连接成层，并层层重叠组成。由于层与层之间是氢键联系，层间吸引力强，使晶层之间的距离固定不变，遇水不易膨胀，故不具有内表面。此类矿物又极少发生同晶替代，由此而产生的负电荷极少，由此吸附阳离子的能力较弱，所以高岭土类的吸水力、可塑性、黏着性以及代换性均较小。高岭土主要见于湿热的热带地区的土壤中，另外在花岗岩残积母质上发育的土壤中含量也较高。其颗粒直径较大，为 $0.1\sim 5.0\mu m$ ，膨胀性小，阳离子代换量也低。富含高岭石的土壤，透水性良好，植物可获得的有效水分多，但供肥、保肥能力低。

1.2.2 土壤有机体

（1）土壤有机质

土壤有机质主要源于土壤中的动植物残体。根据土壤中有机质的来源和存在状态，广义的土壤有机质可分为两大类：一类是活的有机体，包括植物根系和土壤生物；另一类是各种有机化合物。

植物的根系有活根和死根之分，活根提供分泌物，死根提供有机质，作为土壤团粒的胶结剂，须根具有提高土壤抗侵蚀的性能。另外，植物根系分泌物对难溶磷钾及土壤重金属等具有活化作用。土壤和植物根系的交互作用，形成根—土界面特定的微生态环境，它直接决定着植物从土壤中吸收物质的形态、数量、迁移和转化等多种过程。此外，植物根系可以保持或改变土壤的物理结构、化学成分等，对优化和改善土壤，保持土壤圈的天然、正常环境有着无可替代的重要作用。土壤生物包括土壤动物和土壤微生物两大类。土壤动物种类较多，数以千计，其中大型土壤动物数量较少，多数为小型和微型动物，如线虫、原生动物等。土壤动物是土壤有机质的消费者和分解者，在搅动、粉碎、吞食有机质和在有机质的转化过程中起着重要作用，但主要承担有机质转化的是土壤微生物。

有机化合物即狭义的土壤有机质，它又分为两类：①组成生物残体的各种有机化合物，

又称为非腐殖质，占土壤有机质总量的 30%~40%，主要包括蛋白质、糖类、树脂和有机酸；②称为腐殖质的特殊有机化合物，占土壤有机质总量的 60%~70%，是土壤有机质的主体，是通过腐殖化作用形成的、具有特异性的、多相分布的类高分子化合物，包括腐殖酸、富里酸和胡敏质等，它们普遍存在于土壤、腐熟的有机肥料、各种地面水体的底泥和煤炭之中，腐殖质的元素组成和官能团组成见表 1-1。

表 1-1 土壤中腐殖质的组成

组成		腐殖酸	富里酸	组成		腐殖酸	富里酸
元素组成	C	56.2±2.6	45.7±5.0	官能团组成	CO ₂ H	3.6±2.1	8.2±3.0
	H	4.7±1.5	5.4±1.6		(酚) OH	3.9±1.8	3.0±2.7
	N	3.2±2.4	2.1±1.2		(醇) OH	2.6±2.4	6.1±3.4
	S	0.8±0.7	1.9±1.8		(醌和酮) C=O	2.9±2.8	2.7±1.5
(%)	O	35.5±2.8	44.8±5.1	(mmol/g)	OCH ₃	0.6±0.3	0.8±0.5

由表 1-1 中数据可知，在腐殖酸和富里酸的元素组成中，除碳元素占据极大比例外，其中还含有氧、氢、氮、硫等元素。这些元素的组成比也是不固定的。两者比较起来，富里酸的羧基、醇羟基和总酸度量都要大得多。变动的环境因素对腐殖质的结构有很大影响，由此就不难理解，不同地区和土层中所含腐殖质的化学组成可能会有较大差异。土壤中腐殖质胶体是凝胶质的，呈球形并且具有三维空间的网状结构，胶粒直径为 $2\times10^{-8}\sim4\times10^{-8}\text{m}$ ，比表面积高达 $800\sim1\,000\text{m}^2/\text{g}$ 。腐殖质属两性胶体，但通常以带负电为主，电荷来源主要是分子表面的羧基和酚基的离解以及胺基的质子化。土壤中腐殖质组分有很重要的环境意义，这些大分子化合物能通过毛细管作用和渗透作用保持土壤水分，且对土壤有断热保温作用。此外，它能整合金属或吸附其他有机分子，如果这些物质是植物的营养物，则是有利的；如果是污染物，便是有害的。

综上所述，土壤中各种有机物质按其碳、氢、氧原子数之比进行分类如图 1-3 所示。

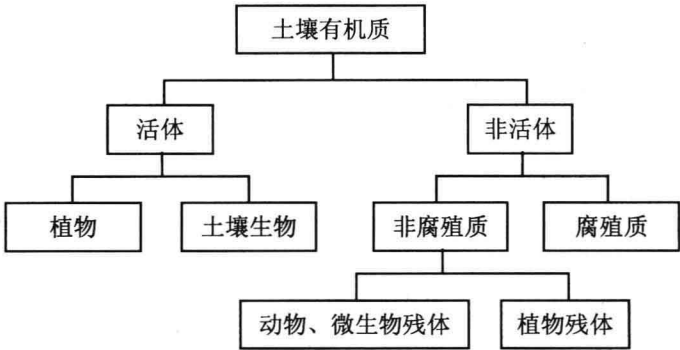


图 1-3 土壤中各种有机物质分类

总之，土壤中的有机质含有植物所需的各种营养元素。腐殖质具胶体特性，有高的代换吸收能力，能保蓄大量养分，促进团粒结构的形成，可调节和改善土壤中的水、肥（养分）、气、热状况。所以有机质含量较高的土壤一般比较肥沃。

(2) 土壤微生物

土壤中生活着一个生物群体，它们不但积极参与岩石的风化作用，而且是成土作用的主要因素。此外，土壤生物还能促进土壤中物质和能量转化，具有净化土壤有机污染物和保持土壤肥力的作用。生物群体与其生活的土壤环境间构成了生态系统，在系统中各种生物间有着复杂的食物链和食物网的关系，但生物群体的组成都处在相对稳定的平衡状态。按营养关系可将土壤中生物分为生产者、消费者和分解者，其中微生物和动物可按表 1-2 所示方式进行分类。

表 1-2 土壤微生物的种类和数量

生物种类		表土层（15cm）中数量/（个数/m ² ）
土壤微生物	细菌	10 ¹³ ~10 ¹⁴
	放线菌	10 ¹² ~10 ¹³
	真菌	10 ¹⁰ ~10 ¹¹
	藻类	10 ⁹ ~10 ¹⁰
动物	原生动物	10 ⁹ ~10 ¹⁰
	线虫类	10 ⁶ ~10 ⁷
	蚯蚓	30~300
	其他动物	10 ³ ~10 ⁵

土壤中细菌可分为好氧、厌氧、自养、异养、光合等几类，最常见的有糖类分解细菌、氨化细菌、硝化和反硝化细菌、硫细菌和硫酸盐还原菌、铁细菌、固氮细菌、动植物病原菌等。细菌个体大小一般为 1~5μm，且有多种形状，有的细菌体上还附有纤毛或鞭毛。很多细菌能分泌多糖类胶质，可将小的黏土或氧化铁粒子黏结一起，对土粒的聚集有很大意义。

表 1-2 中列出的蚯蚓是腐生性动物，以植物残体和动物粪便为主食，故积极参与土壤有机质的转化过程。蚯蚓的活动不仅能改变土壤的化学组成，而且改良了土壤的物理性质——结构性、孔隙性和透气性等。

除上述以外，土壤中还生活着各类节肢动物（小虱、蜈蚣、蚁类、螨类等），腹足动物（蛞蝓、蜗牛等），脊椎动物（两栖类、爬行类和哺乳动物）和掘土动物（食草的啮齿类、兔类等）。

总之，在整个土壤生态系统中，微生物分布广、数量大、种类多，是土壤生物中最活跃的部分。其中细菌、放线菌、真菌与藻类等微生物类群，是净化土壤污染物的主力军。

1.2.3 土壤溶液

土壤溶液是土壤水分及其所包含溶质（包括气体）的总称，是土壤三相间物质和能量交换的结果。在土壤剖面内各土层间物质主要以溶液形式进行运移，因此它在土壤形成过程中起着非常重要的作用。土壤水是作物吸收水的主要来源，也是自然界水循环的一个重要环节，处于不断的变化和运动中，因此影响作物生长和土壤中许多物理、化学和生物学过程。土壤水分并非纯水，事实上是土壤中各种成分和污染物溶解形成的溶液，即土壤溶液。

(1) 土壤水

地球表面全部土壤中含水量约 $2.4 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，不及水圈含水总量的 0.01%，这些水充当了土壤中所发生各种化学反应的介质，对于岩石风化、土壤形成、植物生长有着决定性作用。土壤水主要来自大气降水、灌溉水和地下水。土壤水分的消耗形式主要有土壤蒸发、植物吸收和蒸腾、水分渗漏和径流损失等。土壤孔隙中的水在重力、土粒表面分子引力、毛细管力等共同作用下，表现出不同的物理状态，这决定了土壤水分的保持、运动及对植物的有效性。一般来讲，土壤水分可划分为如图 1-4 所示类型。

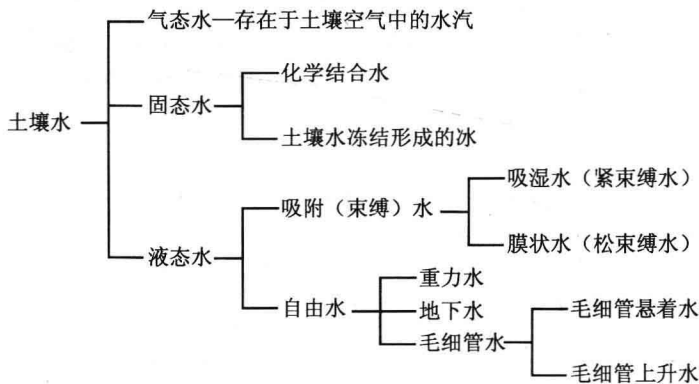


图 1-4 土壤水类型

在以上土壤水分中，影响土壤形成过程和农业利用的主要水分类型有：吸湿水，即借助于土壤固体颗粒表面的分子引力吸附在土壤固体颗粒表面上的气态水；薄膜水，即在土壤颗粒周围的自由表面上，被吸附在吸湿水膜之外的液态水；毛细管水，即被毛细管吸附在土壤毛细管孔隙中的水分；重力水，即在非毛细管孔隙中受重力控制的水分。土壤水分不仅是植物生长所需水分的供给源，也是植物吸收养分的主要输入载体，并参与了土壤中许多重要的物理、化学和生物的过程，深刻影响着土壤中各种物质与能量的交换。

(2) 土壤溶质

土壤溶质的形成是土壤三相成分间进行物质和能量交换的结果。因此其组成非常复杂，常见的溶质有：

① 无机胶体，铁、铝、硅等的水合氧化物。

② 无机盐类离子，主要包括无机阳离子和无机阴离子：阳离子主要有 Ca^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 H^+ ，少量的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 和微量元素离子；阴离子主要有 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 H_2PO_4^- 、 PO_4^{3-} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等。

③ 可溶性有机化合物类：腐殖酸、有机酸、可溶性糖类、蛋白质及其衍生物等。

④ 络合物类：如铁、铝和锰的有机络合物等。

⑤ 溶解性气体类：如 O_2 、 CO_2 、 N_2 等，它们的溶解度是大小顺序为 $\text{CO}_2 > \text{O}_2 > \text{N}_2$ 。

土壤溶质浓度和成分随土壤种类、使用情况和环境条件的不同而有很大变异。除盐碱土和刚施过化肥的土壤外，土壤溶液浓度一般为 0.1%~0.4%。

1.2.4 土壤气体

土壤气体是指土壤孔隙中存在着的各种气体混合物，也称土壤空气，其组成与大气基本相似，以 O₂、CO₂、N₂ 及水汽为主，除此之外还有 CO、H₂、氮的氧化物、甲烷、乙烯、乙炔、氫、氦、氩等 20 余种气体。土壤气体也是土壤的重要组成部分之一，它对土壤微生物活动，营养物质的转化以及植物的生长发育都有重大作用。因此，土壤气体的状况是决定土壤肥力的重要因素之一。土壤是多孔体系，土壤空气存在于未被水分占据的土壤孔隙中。这些气体主要来源于大气，其次是产生于土壤内发生的化学和生物化学过程。土壤空气的数量，通常以单位土体容积中空气所占容积百分数来表示，称为土壤含气量。凡影响土壤孔性和含水量的因素，也都影响土壤的空气含量。土壤空气组成有异于大气的，主要差异见表 1-3。

表 1-3 土壤气体与大气组成的差异

气 体	O ₂ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%	其他气体/%
近地表的大气	20.94	0.03	78.05	0.98
土壤空气	18.0~20.03	0.15~0.65	78.8~80.24	0.98

总体来看，土壤空气组成和大气的组成大同小异。土壤空气有异于大气之处是：①土壤空气是不连续的。存在于土粒孔隙之间。②有更高的湿度。③由于有机物腐烂，使土壤空气中 O₂ 含量较少，而 CO₂ 浓度显著增加（比大气中 CO₂ 浓度多 8~300 倍），但二者之和约为总量的 21%（体积），与大气情况相近。④土壤空气中还含有少量还原性气体，如 CH₄、H₂S、H₂ 等，在某些情况下还可能产生 PH₃、CS₂ 等气体，这些都是厌氧性微生物活动的产物，对植物生长有害。

土壤空气的数量和组成是不断变化的，土壤孔隙状况的变化和含水量的变化是土壤空气含量发生变化的主要原因。土壤空气组成的变化则受两个同时进行的过程制约：一组过程是土壤中的各种化学和生物化学反应，其作用结果是消耗 O₂ 和产生 CO₂；另一组过程是土壤空气与大气相互交换，即空气运动。此两组过程总体表现为一种动态平衡。土壤空气和大气通过对流和扩散进行交换，否则土壤空气中的 O₂ 可能会在 12~24 h 内消耗殆尽。

1.3 土壤剖面结构及形成

1.3.1 土壤剖面结构

在土壤形成过程中，随着各种具体成土过程的进行，都相应地形成一个能够反映该过程特征的典型土层，称为发生土层。由特定的并具有内在联系的多个发生土层组合，形成一定的土体构型。土体构型表现在从地表到母质、母岩底部的垂直截面，称为土壤剖面。不同地区，由于土体内部以及外部条件各不相同，成土过程均存在差异，必然构成各种多样的土体构型，就会形成不同的土壤剖面。土壤剖面可以表示土壤的外部特征，包括土壤的若干发生层次、颜色、质地、结构、新生体等。在土壤形成过程中，由于物质的迁移和

转化，土壤分化成一系列组成、性质和形态各不相同的层次，称为发生层。发生层的顺序及变化情况，反映了土壤的形成过程及土壤性质。土壤剖面发生层一般分为：表土层（A层）、心土层（B层）和底土层（C层），目前多分为 O、A、E、B、C、R 等基本发生层，如图 1-6 所示。

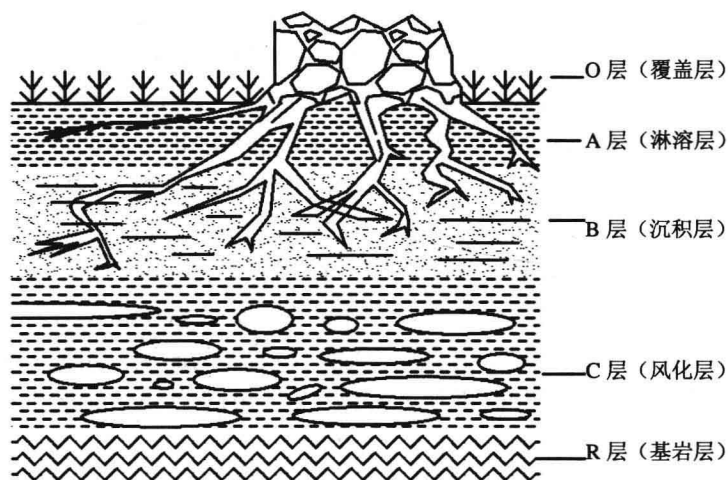


图 1-5 土壤剖面结构图

O 层是森林土壤中由枯枝落叶形成的、未分解或有不同程度分解的有机物质层；A 层是受生物气候或人类活动影响形成的有机质积累和物质淋溶表层，有机质含量高，颜色较暗黑；E 层是硅酸盐黏粒、铁铝等物质明显淋失的漂白淋溶层；B 层是位于 A 层或（若有）E 层之下，硅酸盐黏粒、氧化铁、氧化铝、碳酸盐、其他盐类和腐殖质等物质聚积的淀积层；C 层是位于 B 层或 A 层（在无 B 层时）之下的母质层；R 层即基岩，或称母岩，虽非土壤发生层，但却是土壤剖面的重要组成部分，土壤形成的基础；A 层和 B 层合称为土体层，反映母质层在成土过程影响下已发生深刻的或一定程度的变化，形成土壤剖面上部土层的特征。

对于耕作土壤而言，人类生产活动和自然因素的综合作用，使耕作土壤产生层次分化。典型的耕作土壤剖面层次从上到下大体可以分为三层：表土层、心土层和底土层。

1.3.2 土壤剖面形成

土壤的形成有内在的原因，也有外在的因素。土壤就是在内外因素长期相互作用下发生、发展的，并在此过程中形成了土壤剖面。

（1）成土因素

影响土壤发生、发展的外界环境主要有母质、生物、气候、地形和时间等自然因素，称为五大成土因素。这些因素控制了土壤发育的速度和方向。

① 母质因素，与土壤形成有关的块状岩体称为母岩，与土壤发生有直接联系的母岩风化物称为母质，母质是形成土壤的物质基础，母质的机械组成、化学组成和性质往往被土壤继承下来。

② 生物因素，包括植物、动物和土壤微生物，由于它们将大量的太阳能转化进了成