



中国生态系统研究网络丛书

# 高产栽培理论与技术

董振国 著

气象出版社

# 《中国生态系统研究网络丛书》编辑委员会

**主任:**孙鸿烈

**委员:**(以下按姓氏笔画为序)

王明星 孙鸿烈 孙九林

陈宜瑜 沈善敏 陆亚洲

张新时 赵士洞 赵其国

钱迎倩 唐登银

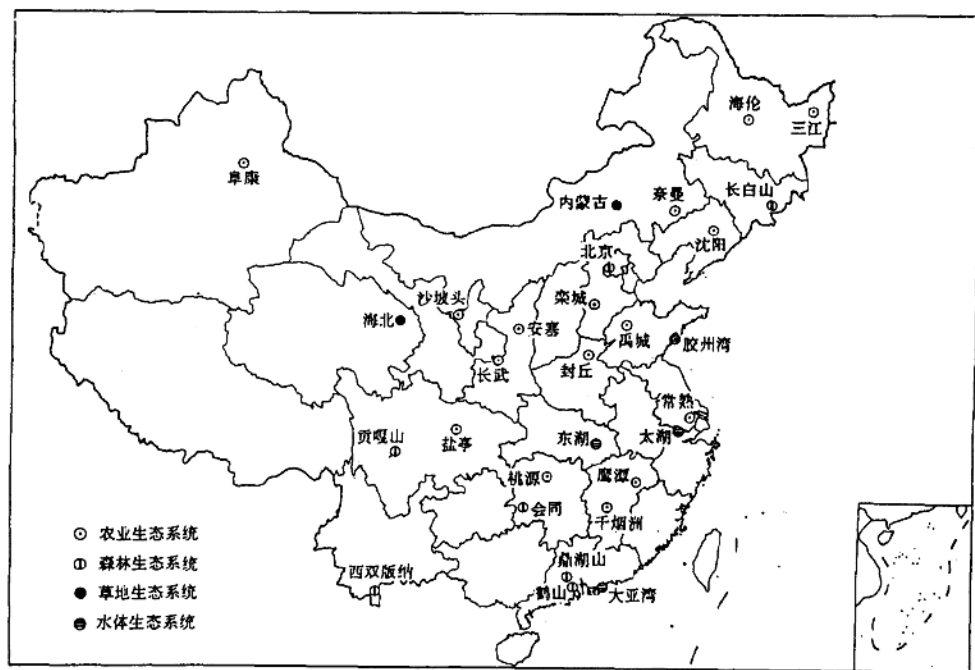
**秘书:**王群力

11/20/2002

## 《中国生态系统研究网络丛书》序

中国科学院自 1949 年建院以来,陆续在全国各重要生态区建立了 100 多个以合理利用资源,促进当地农业、林业、牧业和渔业发展,以及观测和研究诸如冰川、冻土、泥石流和滑坡等一些特殊自然现象为目的的定位研究站。在过去几十年中,这些站无论在解决本地区资源、环境和社会经济发展所面临的问题方面,还是在发展生态学方面,都发挥了重大的作用。

自本世纪 80 年代以来,一方面由于地球系统科学的出现与发展,特别是由于国际地圈-生物圈计划(IGBP)的提出与实施;另一方面,由于日益严重的全球性资源、环境问题所造成的压力,使生态学家们提出了以从事长期、大地域尺度生态学监测和研究为目的的国家、区域乃至全球性网络的议题。就是在这种背景下,中国科学院从已有的定位研究站中选出条件较好的农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统定位研究站 29 个(见中国生态系统研究网络生态站分布图),并新建水分、土壤、大气、生物和水域生态系统 5 个学科分中心及 1 个综合研究中心,于 1988 年开始了筹建“中国生态系统研究网络(英文名称为 Chinese Ecosystem Research Network,缩写为 CERN)”的工作。目前,中国科学院所属 21 个研究所的千余名科技人员参与了该网络的建设与研究工作。



中国生态系统研究网络生态站分布图

网络筹建阶段的中心任务,是完成 CERN 的总体设计。1988~1992 年的 5 年间,在中国科学院、国家计委、财政部和国家科委的领导与支持下,来自我院各有关所的科技人员,详细研究了生态学的最新发展动向,特别着重研究了当代生态学对生态系统研究网络所提出的种种新的要求;了解了世界上已有的或正在筹建的各个以长期生态学监测和研究为目标的网络的设计和执行情况;特别是分析了“美国长期生态学研究网络(英文名称为 U. S. Long-Term Ecological Research Network,缩写为 U. S. LTER Network)”的发展过程,注意吸取了它的经验和教训;同时,结合我国的具体情况,经过反复推敲,集思广益,于 1992 年底完成了网络的设计工作,并开始建设。

与其他网络相比较,CERN 的设计有如下特征:在整个网络的目的性方面,强调网络的整体性和总体目标,强调直接服务于解决社会、经济发展与资源、环境方面的问题;在观测方面,强调观测仪器、设备和观测方法和标准化,以便取得可以互比的数据;在数据方面,强调数据格式的统一和数据质量的控制、数据共享和数据的综合与分析;在研究方法上,强调包括社会科学在内的多学科参与的综合研究,强调按统一的目标和方法进行的,有多个站参与的网络研究。

几年来,通过国内、外专家的多次评议,肯定了上述设计的先进性和可行性,这为 CERN 的总体目标和各项任务的实现奠定了可靠的基础。

CERN 的长期目标是以地面网络式观测、试验为主,结合遥感、地理信息系统和数学模型等现代生态学研究手段,实现对我国各主要类型生态系统和环境状况的长期、全面的监测和研究,为改善我国的生存环境,保证自然资源的可持续利用及发展生态学做贡献。它的具体任务是:

1. 按统一的规程对我国主要类型农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统的重要生态学过程和水、土壤、大气、生物等生态系统的组分进行长期监测;
2. 全面、深入地研究我国主要类型生态系统的结构、功能、动态和持续利用的途径和方法;
3. 为各站所在的地区提供自然资源持续利用和改善生存环境的优化经营样板;
4. 为地区和国家关于资源、环境方面的重大决策提供科学依据;
5. 积极参与国际合作研究,为认识并解决全球性重大资源、环境问题做贡献。

为了及时反映该网络所属各生态站、分中心和综合研究中心的研究成果,CERN 科学委员会决定从 1994 年起设立出版基金,资助出版《中国生态系统研究网络丛书》。我们希望该丛书的问世,将对认识我国主要类型生态系统的基本特征和合理经营的途径,对促进我国自然资源的可持续利用和国家、地区社会经济的可持续发展,以及对提高生态学的研究水平发挥积极作用。



1995 年 4 月 16 日

## 前 言

到 2000 年我国人口将达 13 亿。要满足 13 亿人口对粮、棉、肉、油、菜、果的需求,任务十分艰巨。到 2000 年人均耕地将从现在的  $0.11\text{hm}^2$  减少到  $0.095\text{hm}^2$ 。2050 年则减少为  $0.067\text{hm}^2$ 。在人口增加耕地日趋减少的情况下,必须发展高产栽培,不断提高单位面积产量,发展吨粮田、立体农业和保护地栽培,在有限的耕地上获得较高产量。本书以黄淮海平原的观测试验数据为基础,从理论和技术两方面论述了高产栽培中的有关问题。本书出版希望能对发展我国“两高一优”农业做一点贡献。

作者自 1980 年来长期在农业第一线工作。1980~1982 年参加了黄秉维院士主持的农业生产潜力研究课题,主要从事作物群体结构与农田光能利用率关系研究,主持了冬小麦、夏玉米作物群体结构、农田辐射和热量平衡、作物层温度观测研究。1983~1987 年在中国科学院北京大屯农业生态站工作,主要从事农田小气候、作物群体结构与产量关系研究。1988~1995 年承担了中国科学院重中之重和黄淮海平原农业综合开发重大应用课题,负责山东平原内陆盐碱土开发试验区建设。在开发试验区主要从事重盐碱荒地改造、中低产田改良、吨粮田建设和立体种植试验示范研究工作。在开发试验区建设中,根据当地的实际情况,将理论研究成果应用于生产,解决当地农业生产中的关键问题。

在开发试验区建设中,通过总结当地农民种田经验,并结合多年试验站观测研究成果,提出了鲁西北平原冬小麦精播高产、传统高产和晚播独秆麦田群体结构参数和相应的栽培技术,完成了冬小麦—夏玉米一体化栽培技术,完成了紧凑型和平展型玉米群体结构参数及相应栽培技术研究,试验总结和推广了内陆盐碱土 6 种主要立体种植模式,研究了立体种植所必须遵循的一般原理。多年来从事田间试验观测和近年来从事农业开发工作,为本书写作奠定了基础。

本书出版之际,特别感谢长期在农业第一线工作的广大农业科技工作者,他们不仅直接参与了粮、棉、肉、油的生产,他们的研究成果大大丰富了高产栽培理论,同时也充实了本书的内容。由于仪器设备、试验场地和观测方法等原因,观测数据和结论有不当之处,望广大农业科技工作者批评指正。

作者

1997 年 3 月

# 目 录

## 《中国生态系统研究网络丛书》序

### 前言

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第一章 高产农田土壤障碍性因子</b> .....   | (1)   |
| 第一节 黄淮海平原主要土体构型.....           | (1)   |
| 第二节 土壤物理性状.....                | (3)   |
| 第三节 高产农田土壤障碍性因子.....           | (6)   |
| 第四节 土壤不良物理性状改良措施 .....         | (10)  |
| <b>第二章 高产农田土壤肥力与施肥技术</b> ..... | (13)  |
| 第一节 植物生长发育所必须的营养元素 .....       | (13)  |
| 第二节 农田养分循环与平衡 .....            | (15)  |
| 第三节 化肥与有机肥 .....               | (23)  |
| 第四节 微肥 .....                   | (34)  |
| 第五节 施肥技术 .....                 | (43)  |
| <b>第三章 高产农田作物群体结构</b> .....    | (52)  |
| 第一节 作物群体结构性状 .....             | (52)  |
| 第二节 冬小麦和夏玉米几何性状 .....          | (57)  |
| 第三节 高产冬小麦和夏玉米群体密度和群体叶面积 .....  | (63)  |
| 第四节 高产冬小麦和夏玉米叶日积 .....         | (71)  |
| 第五节 高产冬小麦和夏玉米产量构成 .....        | (74)  |
| 第六节 高产冬小麦和夏玉米栽培技术 .....        | (79)  |
| 第七节 高产麦田光能利用率 .....            | (87)  |
| <b>第四章 作物耗水量</b> .....         | (104) |
| 第一节 土壤持水能力和土壤水分指标.....         | (104) |
| 第二节 作物蒸腾和棵间蒸发.....             | (107) |
| 第三节 $C_3$ 和 $C_4$ 植物耗水量 .....  | (110) |
| 第四节 黄淮海平原主要农作物耗水量.....         | (113) |
| <b>第五章 农田灌溉与节水技术</b> .....     | (123) |
| 第一节 作物缺水判别及作物水分临界期.....        | (123) |
| 第二节 节水型农业及土壤生物学基础.....         | (129) |
| 第三节 节水灌溉技术.....                | (133) |

第四节 农田水分调控技术..... (136)

第五节 高产栽培节水技术..... (138)

**第六章 立体农业..... (144)**

第一节 立体种植设计..... (145)

第二节 立体种植农田小气候..... (149)

第三节 黄淮海平原主要立体种植模式..... (160)

第四节 庭院立体种植..... (169)

第五节 立体种植综合效益..... (172)

**第七章 二氧化碳在高产栽培中的应用..... (181)**

第一节 二氧化碳对作物生长的影响..... (181)

第二节 二氧化碳气源..... (185)

**主要参考文献..... (187)**

# 第一章 高产农田土壤障碍性因子

土壤是作物高产的最基本条件。高产农田土壤应具备的条件是：耕层深 25~30cm，耕层容重  $1.10 \sim 1.30 \text{g/cm}^3$ ，总孔隙度应大于 50%，非毛细管孔隙度大于 10%，大、小孔隙比为 1:2~4，耕层水稳性团粒结构大于 40%，耕层有机质含量 1.5% 左右。土壤具有良好的保水、保肥性能，不板结、不结皮、不起坷垃、易于耕作。土体上、下层相互配合，整个土体水、肥、气、热协调，满足作物整个生育期对水、肥、气、热的需求。

黄淮海平原农田土壤存在的主要障碍性因子有：耕层浅，存在有紧实的犁底层，耕层物理性状欠佳，易板结、起坷垃，耕层水稳性团粒结构少，容重偏高，耕层有机质含量低，底土存在砂礓层和粘土层等。本章论述黄淮海平原土体构型，高产农田土壤障碍性因子及相应的改良措施。

## 第一节 黄淮海平原主要土体构型

土壤的结构形态叫土体构型。土体构型表示了土体不同层次的排列组合关系。影响土体构型的因子主要有土壤质地、结构以及施肥、耕作、灌溉、排水等农业措施，其中土壤质地是土体构型的基础。黄淮海平原的土体构型是由基本质地土层（砂礓质、壤质、粘质和胶泥）、特殊异质土层（砂层、粘化层、潜育层、埋藏黑粘土层、碱化层和泥炭层等）和耕作熟化层构成。农田土体构型可归为 4 大类 10 个类型，即均质型（砂土型、壤土型和粘土型）、薄体型（薄层型、底漏砂型和底障碍型）、夹层型（砂质夹粘型、粘质夹砂型和砂、壤、粘相间型）和上松下紧型。下面分别论述河北栾城县、山东禹城市和北京大屯农业生态站所挖剖面观测到的主要土体构型。

### 一、河北栾城县土体构型

河北栾城县属太行山山前冲积平原，农田 120cm 以上的土壤质除少部分为洪积的砂土和砂壤土外，90% 以上为壤质土，粘土很少。土体构型多为较薄的轻壤质耕层并普遍存在在紧实的犁底层和稍紧实的粘化层，埋藏的黑土心土层和紧实的砂礓底层。

#### 1. 上松下紧型

土体构型上层质地轻，疏松多孔；心土和底土为中壤—重壤—轻粘土稍紧实。此种土体构型，水、肥、气、热协调，物质转化快，托水保肥，既发小苗又发老苗，是一种较理想的土体构型。兼有砂土和粘土的优点，而克服了它们各自的缺点，上下层互相配合，整个土体水、肥、气、热协调，成为一个大肥料库和大水库，从而保证了作物生长对水、肥、气、热的需求。土壤物理性状较佳，耕层容重为  $1.31 \text{g/cm}^3$ ，心底土为  $1.55 \text{g/cm}^3$ ，耕层总孔隙度为



51.3%，心土是 46.3%，底土为 43%左右，1m 土层有效贮水量约 223.4mm。

## 2. 底障碍层型

此种土体构型下层埋藏的黑土心土层比较典型，砂礓的层位较高也较密集，并已成为影响作物生长的障碍层。夏季降水集中期，40cm 以下土层的含水量为 24%~28%，大于田间持水量，影响多余的土壤水下渗。多雨季节，由于上层含水量过多，土体通气性差，微生物活动受抑制，肥料分解缓慢，水、肥、气、热不协调，土体供肥性能差。此种土体构型的作物产量也低于上松下紧型。

## 3. 底礓障碍层型

表土为轻壤，心土为不典型的黑土，底土为坚实的砂礓层，容重高达  $1.57\text{g}/\text{cm}^3$ ，比紧实的犁底层容重( $1.54\text{g}/\text{cm}^3$ )还高。砂礓大而密集，出现的层位也偏高(出现在 66cm)，已影响作物根系的生长。砂礓层的碳酸钙含量为 7%~17%，有的高达 22%。钙积层虽不限制土壤水分运动，但妨碍根系的穿透。碳酸盐影响土壤的理化性质，土壤持水能力下降，田间最大持水量只有 20%左右。犁底层和砂礓层容重高达  $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ，剖面总孔隙度小于 50%，砂礓层仅为 42.9%。毛管持水量耕层为 28.0%，砂礓层为 23.3%，心土层为 25.8%。田间最大持水量心土层为 20%~21%，1m 土层有效水贮量只有 165.6mm，蓄水供水能力差。此种土体构型保水保肥能力差，耕层有机质含量低，作物产量也较低。

## 4. 壤土型

全剖面为轻壤或中壤，有的剖面上层为轻壤，下层为中壤。耕层有机质含量较高，一般为 1.2%左右。耕层容重  $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，心土和底土在  $1.5\text{g}/\text{cm}^3$  以下。比重  $2.68\sim 2.70\text{g}/\text{cm}^3$  之间。总孔隙度耕层为 50%，心土和底土为 45%。田间持水量为 22%~24%，1m 土层有效贮水量为 214.2mm。除犁底层较紧实外，土体构型基本上没有障碍性因子。

## 5. 砂土型

为古河道或泛滥的洪积砂地，土体构型上层为紧砂土，下层为砂壤土，多为果园。剖面质地较轻，粘粒含量少，浸水容重  $0.92\sim 1.17\text{g}/\text{cm}^3$ ，剖面容重  $1.4\text{g}/\text{cm}^3$  左右。田间持水量 16%~18%之间，1m 土层有效贮水量为 154.1mm。此种土体构型适于果树、花生、甘薯等生长。

## 6. 底漏砂型

表层为轻壤，心土为中壤，底土为砂土，是一种上紧下松的不良土体构型，漏水漏肥，55cm 以下为粗砂，1m 土层有效贮水量仅有 151.8mm。

# 二、山东禹城市土体构型

山东禹城市为黄河多次冲积洪积平原，在黄淮海平原具有一定代表性。农田土壤发育在黄土性冲积洪积母质上，质地为壤质土。土体构型受粘土夹层、地下水和盐碱等影响，构

成一个复杂多样的夹层型土体构型。1m 土层内经常出现层位不同、厚薄不一的粘、壤、砂互层。1m 土层内砂礓不普遍存在,仅有部分农田有少量砂礓,但不构成障碍层。3m 土层内,上层为壤质夹粘层,中间为砂壤和砂土,底层为粘土层,此种土体构型是较理想的土壤水库。据计算,1m 土层有效贮水量为 173~226mm,1m 以下至 3m 粘土层可贮水 550~600mm。粘土层出现深度为 2.40~3.40m,地下水位 2.7~3.3m。土体构型中粘土夹层的存在阻滞了水分的运行,但也阻滞了盐分的上升运动,防止返盐。

### 三、中国科学院北京大屯农业生态站土体构型

中国科学院北京大屯农业生态站属山前冲积平原。土体构型与河北栾城县底障碍层型相近。耕层薄、紧实的犁底层,埋有粘土的心土层和砂礓土层,150cm 处有 20~30cm 厚的粘土隔层,大雨或灌水后由于粘土隔层顶托,地面水下渗缓慢。此种土体构型夏季多雨时下渗缓慢,易导致内涝。

综上所述,黄淮海平原土体构型以上松下紧型和壤土型较好,耕层有机质含量较高,保水保肥且不易内涝,水、肥、热、气协调,适于作物生长,此种土体构型农田作物产量也较高。底障碍层型由于土层内含有一定厚度的粘土层,易于保水,但大雨后水分下渗缓慢,土壤通气性差。底礓障碍层型由于土层内含有坚实的砂礓层,容重高达  $1.57\text{g}/\text{cm}^3$ ,大而密集的砂礓层影响作物根系生长和水分的上下运动。砂土型和底漏沙型土壤也不利于作物生长,此两种土体构型漏水漏肥,耕层有机质含量低,保水能力差。采用增施有机肥、深耕、排水防渍涝等农业措施,改良和发挥土体构型的功能。

## 第二节 土壤物理性状

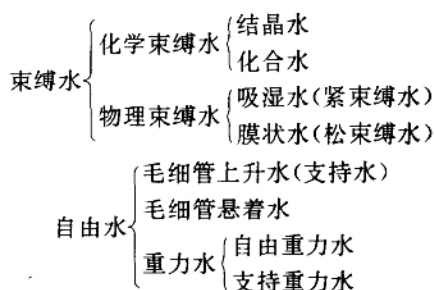
土壤物理性状反映出土壤的保水、保肥和通气性能,是土壤肥力的重要指标。土壤物理性状好的农田,不仅可满足作物生长发育对水、肥、气的需求,而且具有较强的抗旱、耐涝性能,在不利的天气条件下仍可获得较高的产量。根据生产中存在的问题,通过农业措施使不利的土壤物理性状向好的方面转化,是培肥地力使作物持续高产的重要环节。

### 1. 土壤水分

土壤水分是土壤形成不可缺少的条件之一。矿物质风化,有机质合成与分解,及土壤中一切物质的转化都必须有水参与。土壤中水分状况影响着成土过程的性质及成土速度,因而产生肥力的差异。

土壤水分直接影响着土壤固相(土粒)、液相(土壤水)、气相(土壤空气)之间的比例,从而导致了土壤供肥状况、微生物活动、土壤温度和土壤物理机械性(可塑性、粘结性、宜耕性)的差异,土壤水分是土壤肥力的重要组成部分。

根据作用于水分子力的性质及程度,土壤水可分为两大类:



自由水活动性较大不受土粒的束缚,可以在地心引力及毛细管引力的作用下自由运动,是植物根系可利用水。束缚水中除膜状水(松束缚水)能为植物所利用外,其余不能被植物吸收。

## 2. 土壤空气

土壤中的空气除表层干旱时期外,几乎经常呈水汽饱和状态。土壤中心空气的存在有利于土壤中的化学变化和土壤微生物的生长繁殖。土壤中  $\text{CO}_2$  浓度比大气高数十倍以至数百倍,高浓度  $\text{CO}_2$  增加了土壤溶液对矿物质养分的溶解能力。土壤必须有良好的通气性,若通气不良,土壤中产生的大量  $\text{CO}_2$  闭积在土壤孔隙中,土壤中氧气含量减少,土壤肥力降低。土壤通气性和土壤水分一样,也是土壤肥力的重要指标之一。通气性差的土壤,如硫化氢、沼气等不能及时排放,从而影响了根系正常生长。在排水不良或地下水位高的农田,经常出现作物叶片黄萎或生长不良现象。增施有机肥促进团粒结构形成,及时排水和中耕可有效地改善土壤通气性。

## 3. 土壤容重

土壤容重是指土壤结构未被破坏的天然状态下,单位容积中的干土重量,单位  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。土壤容重包括土壤颗粒间的孔隙部分,因此也称假比重。土壤容重决定于土壤结构和有机质含量,还与土壤质地、紧实度和耕作措施等有关。沙质土壤容重较大,变化在  $1.2 \sim 1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;粘质土壤容重变化在  $1.0 \sim 1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,农田耕层容重一般为  $1.0 \sim 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。土层愈深承受的压力愈大,土壤愈紧实,容重也大,底土容重一般为  $1.4 \sim 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

土壤容重不仅表示了土壤颗粒排列的紧实程度,而且也是计算土壤总孔隙度、毛细管孔隙度、非毛细管孔隙度、空气含量的参数。土壤容重是土壤物理性状的基本数据。

土壤容重用下式计算:

$$\text{土壤容重} = \frac{\text{环刀内的干土重(g)}}{\text{环刀容积}(\text{cm}^3)}$$

## 4. 土壤浸水容重

土壤浸水容重表示土样浸水后体积的变化,单位:  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。土壤浸水容重的大小反映了土壤的板结程度和土壤耕作特性的好坏。土壤浸水容重用下式计算:

$$\text{土壤浸水容重} = \frac{\text{烘干样品重(g)}}{\text{土样沉淀体积}(\text{cm}^3)}$$

## 5. 土壤比重

土壤比重定义为单位体积固体土粒的重量,也称土粒密度,单位: $\text{g}/\text{cm}^3$ 。土壤比重是以土壤颗粒与同体积水( $4^\circ\text{C}$ )重量的比值测得。土壤比重的大小与土壤的矿物质组成、有机质含量及母岩、母质特性密切相关。测定土壤比重可采用比重瓶法和定容称重法。

砂壤土比重约为  $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ,轻粘土比重为  $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ,中粘壤土比重为  $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ ,粘土比重  $2.55\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 6. 土壤总孔隙度

土壤是由各种大小不等的颗粒组成,其中大部分是小的颗粒,由于土粒的胶结、垒结,在土壤中形成土壤孔隙,土壤孔隙分为毛细管孔隙和非毛细管孔隙两类。孔隙的大小取决于土壤质地和结构。粘土孔隙小而多,砂土孔隙大而少。土壤孔隙度不仅直接影响土壤的持水能力、通气状况,以及水分的移动,而且也影响了土壤中好气与嫌气细菌的活动,从而影响了土壤中有机质的分解速率和保水、保肥性能。农田耕层总孔隙度为  $50\%\sim 60\%$ ,心土层为  $40\%\sim 50\%$ ,淀积层则仅达  $35\%$ 左右。

土壤总孔隙度一般不直接测定,而是由容重、比重计算求得:

$$\text{总孔隙度}(\%) = \frac{\text{比重} - \text{容重}}{\text{比重}} \times 100 = (1 - \frac{\text{容重}}{\text{比重}}) \times 100$$

## 7. 毛细管孔隙度

毛细管孔隙借助毛细管引力保持水分,其中以  $0.1\sim 0.001\text{mm}$  的毛细管孔隙的作用最活跃。毛细管作用的方向可以上下、左右及任一方向,毛细管曲面曲度小(毛细管半径大)的地方的水向曲面曲度大的地方移动,直到两者平衡。若土壤上、下层质地不同,那么,质地较粗的土壤水向质地较细的土壤移动。土壤中团粒外部的毛细管曲面的曲度都较团粒内部小,所以水分总是从团粒外部向团粒内部移动,最后团粒内部充满了水,而团粒间则充满空气,这就是团粒结构土壤水、气条件好的原因。按下式计算毛细管孔隙度:

$$\text{毛细管孔隙度}(\%) = \frac{\text{环刀内原状土含水量}}{\text{环刀容积}} \times 100$$

## 8. 非毛细管孔隙度

大于  $0.1\text{mm}$  的大孔隙无毛细管引力,称为非毛细管孔隙。非毛细管孔隙是度量土壤通气性的指标,直接关系到土壤的通气状况。非毛细管孔隙还是土壤排出重力水的通道。当降水或灌溉后,超过田间最大持水量的重力水便通过非毛细管孔隙及土壤中的裂隙、根孔和洞孔下渗。

砂土的渗漏作用过大,影响了土壤的蓄水能力,而粘土的渗漏作用过小,使土壤孔隙充满了水分,从而影响了通气性。增加土壤中的有机胶体含量,促进团粒结构形成,使砂土减少非毛细管孔隙,使粘土增加非毛细管孔隙。

非毛细管孔隙按下式计算:

$$\text{总孔隙度} = \text{毛细管孔隙} + \text{非毛细管孔隙}$$

$$\text{非毛细管孔隙} = \text{总孔隙度} - \text{毛细管孔隙}$$

### 第三节 高产农田土壤障碍性因子

黄淮海平原土壤障碍性因子是由自然成土过程和人类长期不合理的耕作制度造成的。多年来,人们没有充分注意用地与养地相结合,耕作、轮作、施肥和培肥地力等措施不利,未能使土壤肥力不断提高,反而形成了一些不利于作物生长发育的障碍性因子。主要表现在:耕层有机质含量普遍较低,养分含量不平衡,主要表现在大部分农田缺磷,耕层浅,水稳性团粒结构少,容重偏高,板结、结皮、耕后起坷垃、有紧实的犁底层、弱粘化层、砂礓层、粘土夹层、盐碱和污染等。上述土壤障碍性因素影响了作物产量进一步提高。

人类耕作活动对土壤耕层质地的影响是非常广泛的,如长期施用以黄土为主的土粪肥,引黄河水淤地、翻淤压碱、翻淤压砂、粘土客土掺砂、砂土客土掺淤等,都对耕层机械组成起到非常重要的作用。黄淮海平原农田耕层质地从砂土、粘土向壤土变化,即向有利于作物生长发育的方向转化。

#### 一、耕层有机质含量低

土壤中有有机质含量是土壤肥力的重要标志。农田是非自养型生态系统,要保持和提高生产力并使之稳定,必须由外界输入一定的物质能量。高产农田土壤肥力的重要指标之一是耕层有机质含量较高,当土壤耕层有机质含量达到某一值后(如大于1.5%),再配合使用化肥和微肥才能满足作物生长发育对营养元素的需求。

近几年我国北方地区不断涌现出大面积高产农田,高产农田土壤耕层有机质含量都大于1.0%。1990年山东桓台县40万亩粮田单产1020kg,成为我国北方地区第一个吨粮县。据测定,全县40万亩粮田耕层有机质含量1987年为1.30%,1988年为1.32%,1989年上升到1.36%。耕层丰富的有机质不仅提供了作物所必需的营养元素,同时也改善了土壤物理性状,为亩产吨粮提供了良好的土壤环境。据沈阳农学院试验表明,秸秆还田后孔隙度增加,改变了三相比。土壤中蚯蚓等动物明显增加,秸秆还田的农田每平方米(0~15cm)有蚯蚓21.2条,重13.9g;未采用秸秆还田的农田每平方米仅有蚯蚓4条,两者相差5倍多。

黄淮海平原的中低产田,耕层有机质含量大都低于1.0%。河北栾城县是全国冬小麦高产区,农田耕层有机质含量平均为1.155%,山东禹城万亩试验区31个剖面耕层有机质平均为0.76%,最高为1.46%,最低仅有0.40%;山东平原开发试区有耕地3.1万亩<sup>①</sup>,耕层有机质平均含量为0.91%,其中5000多亩有机质含量小于0.6%。可见,耕层有机质含量低是影响作物高产的重要因子之一。

#### 二、土壤物理性状欠佳

##### 1. 耕层薄

黄淮海平原农田耕层一般厚约17cm,如河北栾城县耕层厚度13~16cm的占46%,

<sup>①</sup> 1亩=666.7m<sup>2</sup>,下同。

小于12cm的占10%，大于17cm的占44%。山东禹城万亩试验区耕层平均厚度为16.9cm；北京大屯农业生态站耕层厚度为17.2cm；江苏徐淮地区农田耕层厚度小于13cm的占25%，13~17cm的占60%，大于17cm占15%。江苏响水县砂土区耕层厚度为10~15cm；山东邹县耕层厚度是19.6cm，山东省汶上县耕层厚度15~18cm的占69.6%，小于15cm的占30.4%。从以上考察数据可看出，黄淮海平原绝大部分农田耕层厚度为17cm左右。高产农田土壤耕层厚度以30cm为宜，而实际上现在只有17cm，进行深耕打破犁底层是高产农田的重要措施之一。

## 2. 紧实的犁底层

耕作层是指耕层和犁底层，它们是土体构型中最重要的层段。黄淮海平原小麦根系主要集中在耕作层。河北栾城县观测，0~30cm土层内集中了小麦总根量的79.3%~82.1%，30~150cm土层根量仅占17.8%~20.5%。肥沃深厚的耕作层是作物高产的重要条件。

由于人类长期在同一深度反复犁耕，耕层下的土壤受犁具无数次反复耕压，紧实度逐渐增大；同时灌水或大雨后耕层中的粘粒下移，并在犁底层淀积下来。如此反复犁压一淀积一犁压形成了今天有一定厚度的紧实犁底层。犁底层粘粒含量较耕层高，也较其下部过渡层或心土层高。

紧实的犁底层为片状结构，阻碍了耕层与心土之间的水、肥、气、热交换，影响了作物根系向下生长，易造成作物倒伏和渍涝。紧实犁底层的存在还影响了雨水下渗，土壤水库贮水量减小，在坡地还加剧了流域的水土流失。

犁底层的容量一般高于 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。河北栾城县犁底层容重平均是 $1.55\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高达 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ ；北京大屯农业生态站犁底层容重 $1.51\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高为 $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ；山东禹城万亩方试验区犁底层容重平均为 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高为 $1.62\text{g}/\text{cm}^3$ ，河南省兰考县犁底层容重平均为 $1.48\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高是 $1.57\text{g}/\text{cm}^3$ ；安徽淮北平原沙姜黑土犁底层容重为 $1.51\text{g}/\text{cm}^3$ ，最高是 $1.63\text{g}/\text{cm}^3$ 。

由于犁底层紧实容重高，其物理性状也差。田间持水量为19%~20%（重量比），总孔隙度小于45%，通气孔隙一般小于5%，有的仅为2.64%，大小孔隙比为1:5~10，最大为1:14.8，这一比值远远大于适宜值1:2~4。

黄淮海平原农田犁底层厚度一般为10cm左右。如河北栾城县犁底层厚度小于10cm的占86%，大于10cm占14%，其中厚度以6~9cm居多。北京大屯农业生态站和山东禹城万亩试验区犁底层厚度也多在10cm左右。山东邹县、汶上和菏泽等县农田犁底层厚度分别是8.5、10和9.5cm。打破犁底层改善犁底层的物理性状，使耕层、犁底层和心土层之间的水、气、肥、热交换畅通，是高产农田土壤的重要条件。

## 3. 耕层结构欠佳，容重偏高

黄淮海平原农田耕层容重一般都大于 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。河北栾城县95个测点中，容重 $1.2\sim 1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 的仅有5个点，占5%；容重大于 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的也是5个点；容重为 $1.3\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 之间的有85个测点。总孔隙度一般小于50%，最大为52%；毛细管孔隙度为37%~41%之间，非毛细管孔隙平均为10%左右，大、小孔隙比为1:4.5。山东禹城万亩试验

区耕层容重也大于  $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ , 平均是  $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ 。总孔隙度 50% 左右, 毛细管孔隙度 40% 左右; 非毛细管孔隙为 6%~10%, 平均为 8.5%。北京大屯农业生态站耕层容重平均为  $1.42\text{g}/\text{cm}^3$ 。

农田耕层容重  $1.10\sim 1.30\text{g}/\text{cm}^3$  宜于作物生长, 过松或过紧都不利于根系生长。轻壤质褐土试验表明, 适于玉米出苗的容重为  $1.10\sim 1.33\text{g}/\text{cm}^3$ , 当容重大于  $1.42\text{g}/\text{cm}^3$  时易出现缺苗断垄现象。黑钙土耕层容重为  $1.22\sim 1.30\text{g}/\text{cm}^3$  时冬小麦产量最高。

表 1-1 列出耕层(0~20cm)紧实度与冬小麦产量的关系。表中看出, 播前土壤容重  $1.22\text{g}/\text{cm}^3$  和收获前容重  $1.30\text{g}/\text{cm}^3$  的农田冬小麦产量最高; 容重大于  $1.40\text{g}/\text{cm}^3$  和小于  $1.10\text{g}/\text{cm}^3$  的产量低。黄淮海平原耕层容重大于  $1.30\text{g}/\text{cm}^3$ , 比适宜容重略高。非毛细管孔隙应大于 10%, 而黄淮海平原的非毛细管孔隙一般小于 10%, 表明耕层通气透水性差。增施有机肥可使深耕容重变小, 非毛细管孔隙增大。

表 1-1 耕层容重与冬小麦产量的关系

Tab. 1-1 Relationship between bulk density of plough layer and wheat yield

| 耕层容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |      | 亩产(500g) |             |
|--------------------------------|------|----------|-------------|
| 播前                             | 收获前  | 亩产       | 占最高亩产百分比(%) |
| 0.97                           | 1.18 | 283.3    | 85.3        |
| 1.11                           | 1.24 | 322.0    | 97.0        |
| 1.22                           | 1.30 | 332.0    | 100.0       |
| 1.43                           | 1.41 | 256.7    | 76.6        |
| 1.52                           | 1.43 | 216.7    | 65.0        |

#### 4. 耕层水稳性团粒结构少, 粗粉粒含量高

水稳性团粒结构含量是肥沃土壤的重要指标之一。我国肥沃的东北黑土, 大于 0.25mm 水稳性团粒结构占 70%~80%。黄淮海平原耕层大于 0.25mm 的水稳性团粒小于 30%。河北栾城县调查结果表明, 在 30 个土样剖面中, 大于 0.25mm 的水稳性团粒含量在 15%~20% 的占 54.8%, 含量在 20%~30% 的占 29.0%, 含量大于 30% 的仅占 6.5%, 含量小于 15% 的占 9.7%。耕层水稳性团粒结构与产量关系密切。在调查的 30 块农田中, 耕层水稳性团粒结构最高的两块农田分别为 31.6% 和 31.0%, 其产量也最高。

耕层水稳性团粒含量的高低与有机质含量密切相关。一般讲, 有机质含量高的农田, 水稳性团粒含量也高, 反之亦然。如耕层有机质含量为 1.03% 的农田, 水稳性团粒占 12.5%; 有机质含量 1.26% 的农田, 水稳性团粒占 19.4%; 有机质含量 1.82% 的农田, 水稳性团粒占 31.0%。根据黄淮海平原成土母质, 高产农田土壤耕层大于 0.25mm 的水稳性团粒应大于 35%。

黄淮河南平原农田耕层机械组成如表 1-2。耕层土壤机械组成中 0.05~0.01mm 的粗粉粒含量过高, 导致板结。板结并非是耕层粘粒多引起的, 而是由于耕层有机质含量低, 粗粉粒含量高和碳酸钙胶结所致。结皮、板结和坷垃是高产农田不良的物理性状。

从以上分析可认为：高产农田土壤耕层厚度应大于 30cm，耕层容重  $1.10 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ，总孔隙度大于 50%，非毛细管孔隙应大于 10%，大、小孔隙比应为 1:2~4，耕层中水稳性团粒结构应大于 35%，耕层有机质含量应大于 1.5%。

表 1-2 黄淮海平原耕层土壤机械组成(%)

Tab. 1-2 Mechanical composition of plough layer in Huang Huai Hai plain

| 测 点  | 细砂粒<br>1~0.05mm | 粗粉粒<br>0.05~0.01mm | 中粉粒<br>0.01~0.005mm | 细粉粒<br>0.005~0.001mm | 粘 粒<br><0.001mm | 质地 |
|------|-----------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|----|
| 河北栾城 | 28.8            | 49.0               | 9.0                 | 13.2                 | 0.0             | 轻壤 |
| 河北栾城 | 23.8            | 53.0               | 11.0                | 10.6                 | 1.6             | 轻壤 |
| 河南淮阳 | 33.2            | 44.75              | 6.1                 | 5.8                  | 10.1            | 轻壤 |
| 河南封丘 | 9.9             | 60.95              | 6.1                 | 8.1                  | 15.0            | 轻壤 |
| 安徽蒙城 | 2.0             | 55.0               | 9.0                 | 10.0                 | 24.0            | 中壤 |
| 山东禹城 | 9.4             | 64.05              | 5.2                 | 3.11                 | 18.2            | 轻壤 |
| 河南兰考 | 71.87           |                    | 28.13               |                      |                 | 轻壤 |

### 5. 底土存在砂礓层或粘土层

砂礓层多为粘土，土壤水分物理性状差。容重一般大于  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ，有的地块高达  $1.57 \text{ g/cm}^3$ 。砂礓层的碳酸钙含量为 7%~17%，高者为 22%。碳酸钙的存在使土壤持水能力下降，田间最大持水量仅有 20% 左右。浸水容重为  $0.80 \text{ g/cm}^3$ 。土壤干时僵硬，湿时泥泞。作物根系不易穿透，土体中的碳酸钙是作物生长中的不利因子。

土体中粘土层的存在有好、坏两方面作用。粘土夹层对底层水盐上升起阻滞作用，蒸发减少，可防止返盐。粘土夹层的存在同样也阻止了地表水下渗，多雨季易发生因土体过湿渍涝而减产。北京大屯农业生态站试验地 150cm 深处有 20~30cm 厚的粘土隔层，大雨或大水漫灌后地表形成临时性潜水，影响了作物生长。黄淮海平原农田土体中粘土夹层普遍存在，多雨夏季土壤过湿渍涝严重。土壤过湿可采取修台、条田等田间工程治理。

## 三、土壤盐碱化和污染严重

黄淮海平原的盐碱土可分为内陆盐碱土和滨海盐碱土两大类，这两类盐碱土在改良和利用上有很大差别。

内陆盐碱土是在较高的地下水矿化度和地下水埋深高于临界水位的情况下形成的，土壤的成土过程主要表现为盐化、碱化和潜育化过程，人为开垦耕种又表现为旱耕熟化过程。按土壤形成过程的不同和盐碱化程度，内陆盐碱土主要包括盐化潮土、碱化潮土、盐化草甸土和潮盐土等土壤类型。

滨海盐碱土遍及滨海平原和近代黄河三角洲平原上，成土母质为陆相与海相交错沉积物或海相为主的沉积物。成土年龄较短，一般无明显的发育层次，土体含有较多的盐分，



以氯化物为主,局部地区有苏打盐碱化现象。根据滨海盐碱土的形成条件和成土过程又分为滨海潮滩盐碱土、滨海盐碱土及滨海沼泽盐碱土三个亚类。

土壤盐碱化对农业生产是个严重的限制因子。土壤盐碱化主要产生于不合理的灌溉。黄淮海平原 50 年代盐碱土面积为 272.06 万  $\text{hm}^2$ ,60 年代由于只灌不排,盐碱土面积扩大至 405 万  $\text{hm}^2$ ,70 年代因采用了抽引浅层地下水用于灌溉,地下水位下降,盐碱土面积明显减少,盐碱危害也相应减轻。近几年因连续干旱,降水量偏小,大量引黄灌溉,盐碱土面积又有所扩大。目前,黄淮海平原有盐碱土面积为 222.46 万  $\text{hm}^2$ 。

北京、天津、石家庄等大城市附近的农田长期引用未处理的工业、生活废水灌溉,造成土壤严重污染。天津市污水年排放量 4.1 亿  $\text{t}$ ,加上北京入境的 3.7 亿  $\text{t}$ ,共 7.8 亿  $\text{t}$ ,灌溉 223 万亩农田,占天津市总耕地面积的 32%。北京市每天排放污水 180 万  $\text{t}$ ,污灌面积 90 万亩。污灌区土壤物理特点是表层土壤容重较高,一般大于  $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ,有的高达  $1.49\text{g}/\text{cm}^3$ ,总孔隙度在 45% 左右。

据测定,污水含氮量为  $20\text{mg}/\text{kg}$  左右,以每次每亩灌水  $50\text{m}^3$  计,每次灌入土壤中的氮约 2kg,相当于 5kg 硫酸的含氮量。污水中还含有铜、锌、镉、铬、砷、氰化物和酚等有毒物质。随着污灌年限增加,有毒物质在土壤中及浅层地下水中的积累量亦随之增加。污灌 10~15 年以上的农田,土壤及浅层地下水中的有毒物质含量已达到或超过国家规定标准。据测定,污灌区农田土壤中的砷含量平均为  $9.23\text{mg}/\text{kg}$ ,清水灌区含量是  $8.22\text{mg}/\text{kg}$ ;污灌区铬的含量平均为  $83.32\text{mg}/\text{kg}$ ,清水灌区为  $71.58\text{mg}/\text{kg}$ 。污灌区玉米中砷的残留量平均为  $0.246\text{mg}/\text{kg}$ ,铬为  $0.82\text{mg}/\text{kg}$ ;清水灌区玉米中砷和铬的残留量平均值分别是  $0.14\text{mg}/\text{kg}$  和  $0.425\text{mg}/\text{kg}$ 。污染不仅破坏了土壤和地下水资源,而且也破坏了农田生态系统。

## 第四节 土壤不良物理性状改良措施

黄淮海平原农田耕层不良土壤物理性状是人类长期不合理的耕作活动造成的,因此,可通过人为措施逐步加以改良,使其向好的方向转化。

### 1. 增加土壤有机质含量

增加有机质是消除容重高、结构欠佳、板结、结皮、起坷垃和水稳性团粒结构少的有效措施之一,同时还减轻旱涝盐碱的危害。增加土壤有机质除增施有机肥外,还有以下途径:

#### (1) 增施化肥

增施化肥可较大幅度提高作物产量,增加秸秆还田量和养畜量,秸秆“过腹还田”可增加有机肥。作物提高产量后,不仅秸秆增加,田间残留的根量也相对增加。河北省栾城县试验表明,亩产 400kg 左右的冬小麦,收获时地上部总干重 1328kg,根干重总量为 354.7kg,即根干重与籽粒干重基本相同。不同深度根量分布是,耕层(0~20cm)占 74.6%,犁底层(20~28cm)占 7.6%,心土层(29~67cm)占 9.6%,砂礓层(68~150cm)占 8.2%。由于犁底层的土壤物理性状差,根系分布少于心土层和砂礓层。根量的增多和加深有利于改良犁底层、心土层和砂礓层的不良物理性状。

#### (2) 建立合理的耕作制度,用地养地相结合