

# 东北北部黑土水分状况之研究

## II. 黑土农业水分状况及水分循环\*

乔樵 沈善敏 曾昭顺

(中国科学院林业土壤研究所)

黑土分布区就其气候的水热条件而言属于温带半湿润区,按改进的谢梁尼诺夫公式计算的干燥度为0.9—1.0(中国科学院自然区划工作委员会编,1959)。这一数值可理解为黑土分布区的降水量与可能蒸发量大致相当,在气候上不干也不湿。但由于年际之间的气候多变,因此事实上黑土区也有旱涝发生。1959年春、夏之间,该区遭受了历史上罕见的干旱气候的袭击,黑龙江省嫩江九三地区6月25日以前的半年降水量仅为27.2毫米,不足正常年份同期降水的五分之一。1961年又出现了一次春季干旱,造成了九三地区国营农场数十万亩小麦大面积减产。这些严峻事实促使我们进一步研究黑土的农业水分状况和土壤水分的调节利用,并取得了一些结果(乔樵等,1963;中国科学院林业土壤研究所黑土工作队等,1961)。这些研究中较重要的一个结论是:黑土高度发育的季节性土壤冻层是作物生长前期的重要水分来源,在春季少雨年份(例如1959年)则是作物赖以渡过早期的重要凭借<sup>1)</sup>。

本文是1963年以来的研究结果,主要研究不同作物下土壤水分的变化状况。土壤水分定点观测是在国营农场九三管理局农业科学研究所试验区的深厚黑土上进行的,取样测定的日期为每月的1,11,21日,每次均取四个钻孔测定结果的平均值。

### 一、试验区农业水分物理特性概述

现将试验区深厚黑土农业水分物理特性历年来测定结果的平均值列于表1。

表1中所列“土壤稳定湿度”乃是指土壤水分对植物有效程度的一个分界。当低于这个数值时,土壤水分的有效性显著降低,因而在这种情况下作物只能获得较低的产量。“土壤稳定湿度”相当于Абрамова(1953)所称的“土壤毛管联系断裂湿度”。对表1中的其它数字还应指出以下两点:

(1)黑土具有强大的蓄水保水能力,土壤湿度为田间持水量时,1米土层的总持水量可接近400毫米或有效水量180余毫米,后者相当于当地年降水量的40%。因此,保持和发展黑土的这种特性,对调节农田水分状况改善农田水分供应条件,将具有十分重要的意义。

\* 本文写作于1970年10月,这次发表作了一些删节和修改。

1) 沈善敏,刘振英,1959:东北北部黑土季节性土壤冻层对作物抗旱的意义。(资料)

表 1 深厚黑土农业水物理特性

深度 (厘米)	比重	容重 (克/毫升)	孔隙度 (%)	土壤水分常数(%)				土壤水分常数(毫米)			
				田间持水量	土壤稳定湿度	凋萎湿度	最大吸湿量	田间持水量	土壤稳定湿度	凋萎湿度	最大吸湿量
0—10	2.55	0.90	64.7	40	26	18.5	12.0	36.0	23.4	16.7	10.8
10—20	2.57	1.00	61.2	40	26	18.5	12.0	40.0	26.0	18.5	12.0
20—30	2.58	1.05	59.3	35	23	18.5	12.0	36.8	24.2	19.4	12.6
30—40	2.58	1.15	55.5	32	21	17.0	12.2	36.8	24.2	19.5	14.0
40—50	2.60	1.20	53.8	31	20	17.0	12.5	37.2	24.0	20.4	15.0
50—60	2.60	1.20	53.8	31	20	17.0	12.5	37.2	24.0	20.4	15.0
60—70	2.62	1.30	50.0	31	20	17.0	13.0	40.3	26.0	22.1	16.9
70—80	2.65	1.40	47.2	30	20	17.0	13.0	42.0	28.0	23.8	18.2
80—90	2.65	1.40	47.2	30	20	17.0	13.5	42.0	28.0	23.8	18.9
90—100	2.65	1.40	47.2	30	20	17.0	13.5	42.0	28.0	23.8	18.9
0—100								390.3	255.8	208.4	152.3

(2) 黑土中难于被植物利用的水分是指土壤湿度小于凋萎湿度的那部分水分,习惯称之为无效水。黑土 1 米土层的无效水为 208 毫米。大于凋萎湿度的部分称有效水,当土壤湿度为田间持水量时,1 米土层的有效水量为 182 毫米,但如上所述,更有效的应是大于土壤稳定湿度的那部分水分,其值为 135 毫米。

## 二、不同作物影响下的土壤水分状况

### (一) 不同作物下土壤水分的季节变化

在 1963, 1964, 1966 三年中,对不同作物下黑土的水分状况及土壤水分的循环过程进行了比较研究。1963, 1964 两年观测的作物计有:小麦、大豆、玉米、谷子、马铃薯和绿肥半休闲;1966 年为大豆、小麦、玉米。这三个观测年度分别代表了气候上的丰水年(1963 年降水量 572 毫米)、平水年(1966 年降水量 487.3 毫米)和缺水年(1964 年降水量 350.7 毫米),使观测资料具有较好的代表性。三个年份小麦、大豆、玉米下土壤的水分状况试验结果列于图 1。谷子及马铃薯下的土壤水分状况分别与大豆、玉米相似,故不另刊出。

由图 1 可以看出,由于各类作物生长发育节律和各发育阶段消耗水分的强度不同,在同一水文年度里,不同作物下各时段的土壤水分状况常常有明显差别。大致情况如下:

(1) 一般地说,不论在任何水文年度里(丰水、平水或欠水年),玉米地土壤始终最为湿润,即使在干旱少雨的 1964 年,除表层以外土壤湿度均可保持在土壤稳定湿度以上;大豆地其次,可保持在土壤稳定湿度上下;小麦地土壤湿度最低,在干旱年份土壤湿度可下降到接近凋萎湿度。这种差异在缺水或平水年较为明显,在多雨的 1963 年由于降水的影响使这种差异部分地得到了消除。

(2) 虽然不同作物下黑土水分的季节变化大致保持了黑土水分动态的固有规律,即春季的融湿期、夏季的低湿期、秋季的聚湿期(或湿度恢复期)和冬季的冻结期。但这一过

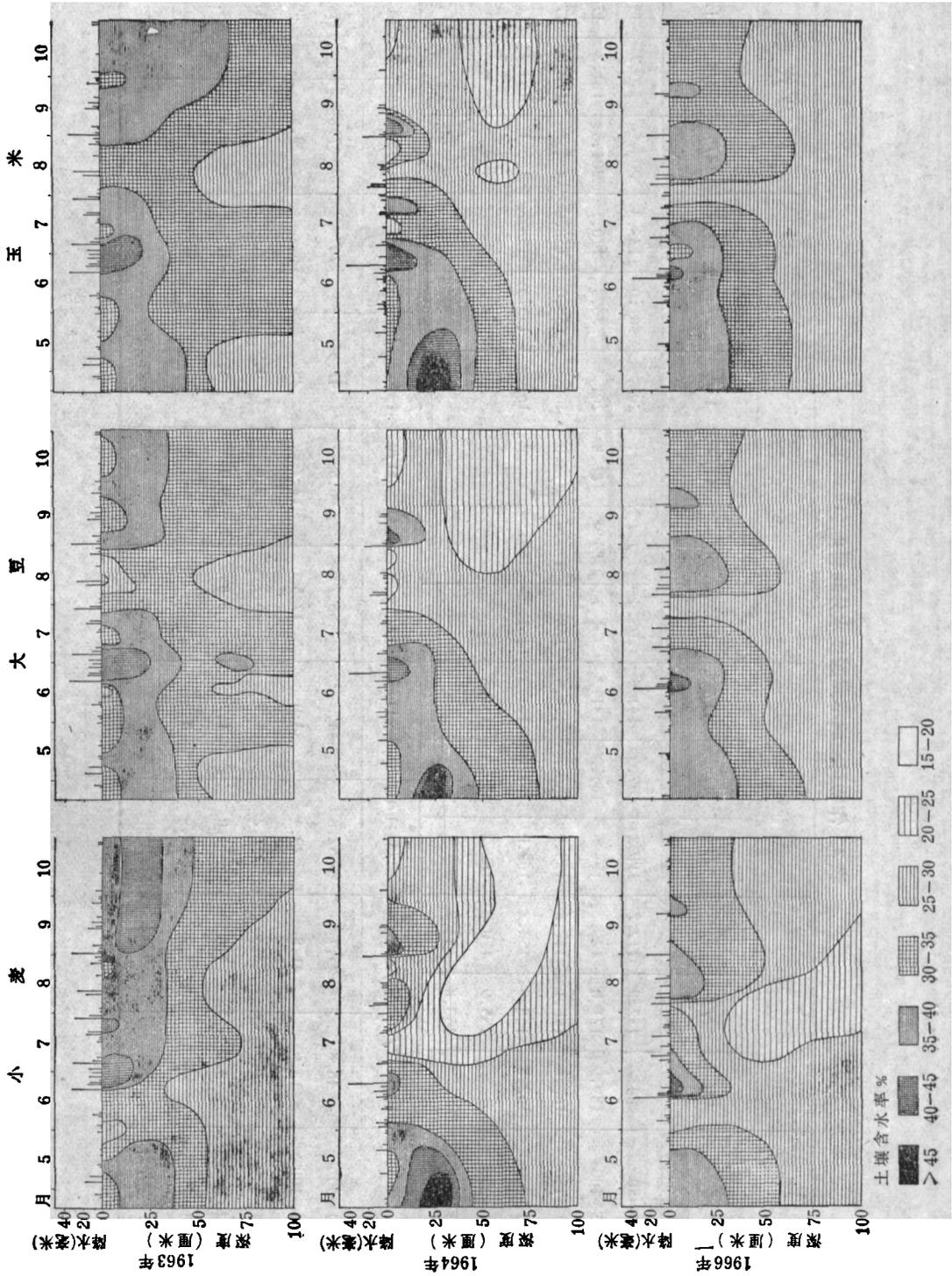


图1 不同作物下黑土水分季节动态(绘图: 陈楚燕)

表 2 作物对土壤不同深度水分的利用 (1964年)

作物 日期(日/月) 深度(厘米)	小 麦		大 豆		玉 米		谷 子			马 铃 薯					
	13/5	7/7	6/8	12/5	1/8	11/9	12/5	4/8	11/9	13/5	5/8	12/9	12/5	2/8	12/9
土壤含水量 (毫米)	184.7	137.9	112.2	190.1	137.3	141.5	208.4	151.7	145.1	208.5	161.0	133.3	208.5	140.7	158.1
	189.9	171.0	129.2	194.6	165.2	131.2	201.5	184.0	166.8	201.5	176.3	170.1	201.5	181.2	176.9
	167.6	166.1	157.8	173.9	166.7	168.6	168.9	175.6	173.0	168.9	168.0	158.6	167.7	172.8	177.5
	162.8	158.8	154.2	162.0	163.0	161.3	161.1	159.3	168.3	161.3	155.5	158.8	166.1	163.2	166.9
	-	155.9	150.7	162.2	159.3	159.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	153.8	154.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
作物利用水量 (毫米)	13/5-7/7	7/7-6/8	12/5-1/8	1/8-11/9	12/5-4/8	4/8-11/9	13/5-5/8	5/8-12/9	12/5-2/8	2/8-12/9					
	46.8	25.7	52.8	-4.2	56.7	6.6	47.5	27.7	67.8	-17.4					
	18.9	41.8	29.4	34.0	17.5	17.2	25.2	6.2	20.3	4.3					
	1.5	8.3	7.2	-1.9	-6.7	2.6	0.9	9.6	-5.1	-4.7					
	4.0	4.6	-1.0	1.7	1.8	-9.0	5.8	-3.3	2.9	-3.7					
	-	5.2	2.9	-0.5	-	-	-	-	-	-					
	-	-0.4	-	-	-	-	-	-	-	-					

程在细节方面随不同水文年度和不同作物的影响而有明显区别,表现在某一土壤水分时期出现的迟早和土壤湿度下降或上升的幅度等有着某些不同之点。例如,在小麦地上,低湿期的出现要略早于大豆或玉米地,土壤湿度下降的程度也较显著。再如,小麦地土壤湿度恢复期的到来通常较大豆、玉米地早,但由于前期小麦地土壤水分消耗强烈,后期土壤湿度恢复的程度往往不能达到大豆或玉米地的湿度水平,等等。

## (二) 作物对土壤不同深度水分的利用

在土壤湿度不超过田间持水量的情况下,植物对土壤中水分的利用多半是由于植物根系不断向土壤深度、广度扩展的结果。不同作物的根系在土壤中伸展的深度颇不相同,因而对土壤深层水分的利用也有明显区别。

1964年土壤解冻时1米土层蓄积的有效水分达230毫米以上,同时,这一年6月以后的降水较少,所有作物的生长中期和后期大量利用了土壤中贮蓄的水分(表2)。这些情况为研究作物对土壤不同深度水分的利用提供了十分有利的条件。

由表2可见,所有作物对土壤中0—50厘米深度的水分都有强烈的利用,特别是在生长前期,作物根系主要分布在土壤上层,所以上层土壤中水分的消耗特别明显。50—100厘米土层中的水分所有作物也都能利用,尤其是小麦及大豆生长后期对这个深度水分的利用强度明显地超过了生长前期,这显然是由于根系活动层向土壤深度推进所致。某些作物如马铃薯等的根系较浅而且衰亡较早,所以生长后期对这一层土壤水分的利用极少。对于100—150厘米深度的土壤水分,看来除根系强大的小麦、大豆等尚可少量利用外,玉米和马铃薯等作物实际上已不能利用。至于超过150厘米深度以下的土壤水分,所有作物均很少有利用可能,因此150—200厘米土层中的贮水量从春至秋事实上并无明显变化。黑土深层水分难于被作物利用的原因可能主要不是取决于作物的本性,而是与黑土深层长年处于冻结或低温状态,限制了作物根系向下伸展有关。

鉴于大多数作物对黑土水分的利用主要集中于土壤上层,因此,研究耕地黑土水分状况、作物的耗水数量和进行相应的农业水文计算,在无明显的土壤水分渗漏的情况下,应用1米深度的土壤水分资料已经足够。计算结果表明:用0—100厘米土壤水分资料计算作物的耗水量,其误差不超过10%(表3)。

## 三、不同作物下土壤水量循环的一般规律

### (一) 不同作物的田间蒸发进程及耗水量

在田间条件下试图把作物蒸腾和土壤蒸发分开进行研究,实际上还有许多困难,因此本节只能讨论不同作物的田间耗水量及其进程。现将1963, 1964, 1966三年几种作物各月、旬的平均耗水量列于表4。

从表4可以看出,不同作物不仅有着不同耗水规律,而且在耗水强度上也有着明显的区别。这说明田间蒸发进程虽然十分明显地受气象条件所控制,但作物本身的生长发育节律对蒸发进程同样起着巨大的影响。小麦不仅耗水强度大,田间蒸发耗水的高峰也比其它作物提前出现,一般是在6月下旬和7月上旬之间。大豆、玉米的蒸发耗水高峰出现较晚,大致是在7月下旬前后。8月小麦收获后小麦地的田间蒸发强度急剧下降,而大

表3 用不同土壤湿度观测深度计算作物耗水量的误差(1964年)

作物	小麦		大豆		玉米		谷子		马铃薯													
	观测日期(日/月)	13/5-7/7	7/7-6/8	12/5-1/8	1/8-11/9	12/5-4/8	4/8-11/9	13/5-5/8	5/8-12/9	12/5-2/8	2/8-12/9											
观测期间降水(毫米)	147.3	65.1	177.9	90.6	177.9	90.6	192.1	98.1	177.9	98.1												
*作物耗水量(毫米)	土壤湿度计算深度(厘米)	0-50	194.1	88.8	90.8	62.4	230.7	86.4	86.4	71.9	234.6	95.1	97.2	90.0	239.6	88.4	125.8	91.0	245.7	93.2	80.7	105.3
		0-100	213.0	97.5	132.6	91.1	260.1	97.7	120.4	100.0	252.1	102.0	114.4	106.0	264.8	97.5	132.0	95.5	266.0	101.0	85.0	111.0
		0-150	214.5	98.2	140.9	96.8	267.3	101.5	118.5	98.5	245.4	99.2	117.0	108.2	265.7	97.8	141.6	102.3	260.9	99.0	80.3	104.9
		0-200	218.5	100	145.5	100	266.3	100	120.2	100	247.2	100	108.0	100	271.5	100	138.3	100	263.8	100	76.6	100

\*作物耗水量等于观测期间降水量加上土壤中贮水的减少量。

表4 小麦、大豆、玉米田间耗水量(1963, 1964, 1966三年测定值平均)

作物	耗水量(毫米)	5月		6月		7月		8月		9月		10月		5月至10月中旬					
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬							
小麦(合作六号)	旬计	23.7	21.8	30.2	36.9	39.1	55.7	52.1	38.5	46.4	24.5	15.2	18.4	23.9	7.0	11.9	12.0	13.1	470.4
	月计	75.7		131.7		137.0		58.1		42.8									
大豆(黑龙江41号)	旬计	17.2	18.5	11.8	33.0	35.5	43.5	47.9	36.7	57.6	41.6	23.1	22.2	23.5	15.2	16.6	7.7	6.2	457.8
	月计	47.5		112.0		142.2		86.9		55.3									
玉米(黄八瓣)	旬计	12.8	14.9	15.8	22.8	25.0	34.3	32.4	31.9	58.1	34.0	30.6	23.0	27.7	11.5	10.8	14.2	14.6	414.4
	月计	43.5		82.1		122.4		87.6		50.0									

作物生长期田间耗水量: 小麦: 5月上旬-8月上旬, 102天, 368.9毫米。  
 大豆: 6月上旬-9月中旬, 112天, 379.8毫米。  
 玉米: 6月上旬-9月中旬, 112天, 331.3毫米。

豆、玉米这时还在继续生长,因此后两种作物在 8 月份尚可保持较强的蒸发耗水。大豆、玉米具有相似的耗水规律,但玉米的蒸发强度又逊于大豆,它们的共同特点是: 生长前期耗水较少,后期耗水稍多,具有较平缓的耗水高峰。

不论小麦、大豆、玉米或其它作物(马铃薯、谷子),它们的耗水高峰大致都和它们的生命活动最旺盛的时期(小麦: 抽穗—开花;大豆: 开花—结荚;玉米: 抽雄)相一致。

作物一生的总耗水量一方面取决于各发育阶段的蒸发强度,同时也取决于生长期的长短。小麦虽比大豆具有较强的耗水强度,但生长期较大豆为短,所以在正常情况下小麦一生所消耗的水量较大豆略少。玉米消耗水分的能力无论强度或总量均不如小麦或大豆。据 1963, 1964, 1966 三年测定结果的平均,小麦一生的耗水量为 369 毫米,大豆 380 毫米,玉米仅 331 毫米。如果把作物生长前和收割后的田间土壤蒸发也计算在内,则小麦地的年总蒸发量最大为 470 毫米,大豆其次,为 458 毫米,玉米最少为 414 毫米。这是由于小麦非生长季节比大豆、玉米要长,消耗于土壤蒸发的水量也要多些。

## (二) 作物收获后遗留在土壤中的水分

如上所述,由于各种作物一生所消耗的水量不同,因此收获后遗留在土壤中的水量也有一定差别(表 5, 6)。为了便于比较,所有测定都是在土壤开始冻结后进行的。

表 5 不同作物收获后土壤冻结时 1 米土层有效水量(单位: 毫米)

测定日期	小麦	大豆	玉米	谷子	马铃薯	绿肥半休闲	当年降水量
1963 年 10 月 20 日	204.0	203.4	215.4	210.5	193.7	195.6	572.4
1964 年 10 月 20 日	42.4	81.5	84.0	80.9	101.1	113.0	355.7

注: 九三地区农科所实验地调查测定。

表 6 历年小麦、大豆、玉米收获后土壤冻结时 1 米土层有效水量(单位: 毫米)

地点 日期(日/月)	九三农科所实验地				
	1965 年	1966 年	1967 年	1968 年	1969 年
作物	30/10	22/10	28/10	1/11	4/12
小麦	162.8	135.4	69.7	132.0	196.2
大豆	157.5	151.8	93.4	138.9	211.6
玉米	148.0	160.3	108.1	138.3	—
年降水量	441.3	487.3	398.7	397.6	599.6

从表 5, 6 可见,不同作物收获后遗留在土壤中的水量差异明显受当年的降水量所影响。在降水特别丰沛的年份(如 1963, 1969), 由于 1 米深度土层中的水分贮量普遍都超过了田间持水量,因而掩盖了作物种类不同所造成的差异。在年降水量较少的年份(如 1964, 1967), 这种差异就十分明显,一生耗水较少的作物如绿肥半休闲、马铃薯、玉米等遗留在土壤中的水量就较多,谷子、大豆其次,而以小麦地土壤的水分贮量最少。

作物生长好坏一定程度上也可影响作物一生的耗水数量。例如 1965 及 1968 两年分别发生了大春旱,严重影响了小麦的生长和产量,这两年小麦一生消耗的水量较正常情况略少,因而遗留在土壤中的水量可与大豆、玉米相差无几甚至略超过之。

表7 冻结过程中1米土层贮水量的增长量(单位:毫米)

测定日期 (日/月)	1963—1964年度						1964—1965年度						1965—1966年度											
	大豆			绿肥半休闲			大豆			绿肥半休闲			小麦			大豆			谷子			玉米		
	1963年 20/10	1964年 30/3	1963年 20/10	1964年 30/3	1963年 6/4	1964年 20/10	1963年 7/4	1964年 20/10	1963年 30/10	1964年 21/3	1965年 30/10	1966年 21/3	1965年 30/10	1966年 21/3	1965年 29/10	1966年 22/3	1965年 30/10	1966年 20/3						
0—10	29.5	36.3	29.8	39.4	21.1	20.3	24.6	25.7	34.1	24.5	33.0	22.1	27.0	23.7	35.9									
10—20	36.5	46.2	39.2	48.8	30.6	30.1	33.1	35.4	39.4	36.6	36.0	37.1	35.5	36.6	34.8									
20—30	37.9	54.4	41.5	56.3	31.6	32.6	36.0	37.8	38.4	37.0	36.3	32.1	35.4	36.9	40.2									
30—40	42.2	53.4	40.7	50.6	32.1	35.1	35.0	38.4	37.4	36.5	38.2	35.7	36.8	36.0	43.7									
40—50	41.3	40.9	40.2	42.1	29.4	31.7	40.8	36.4	38.1	37.9	39.1	35.6	36.2	35.8	45.5									
50—60	40.5	41.8	39.1	41.2	26.8	30.7	35.3	37.1	36.1	37.1	34.2	35.5	36.2	35.8	39.7									
60—70	43.6	41.4	42.8	43.5	30.3	30.2	38.0	39.0	37.3	38.6	36.6	37.7	39.3	36.6	43.3									
70—80	47.6	40.2	45.0	44.7	33.3	36.3	41.0	40.9	41.2	40.6	41.8	40.2	40.5	38.9	38.2									
80—90	46.8	37.5	43.1	40.2	34.0	36.6	38.8	41.8	38.8	39.0	40.5	39.2	40.0	38.4	39.6									
90—100	46.0	35.7	42.4	38.2	33.6	36.3	33.6	39.2	38.1	38.4	41.4	38.2	37.8	38.1	39.6									
0—100	411.9	427.8	403.7	445.0	290.0	310.8	356.2	371.7	378.9	366.2	377.1	353.4	364.7	356.8	400.5									
增长量*	15.9	41.3	20.8	36.3	7.2	10.8	11.3	43.7																

\* 增长幅度: 10.8—43.7毫米 平均: 23.4毫米。

### (三) 冻结过程中土壤水分贮量的变化

冻结过程中土壤水分贮量的变化是农田水分年循环中的最后一个环节。连续三年的观测表明,由于冻结过程中土壤水分在垂直方向上的再分配,可使 1 米土层中的水分贮量和土壤湿度剖面发生较大的变化。

表 7 及图 2 所列资料表明了在不同土壤湿度水平情况下水分在冻结过程中向上集聚的情况。1963—1964 年度土壤冻结时 1 米土层的总持水量在 400 毫米以上,即超过了田间持水量;1965—1966 年度土壤冻结时的持水量在 350—370 毫米之间,略低于田间持水量;1964—1965 年度土壤冻结时的持水量仅 300 毫米左右,显著低于田间持水量。

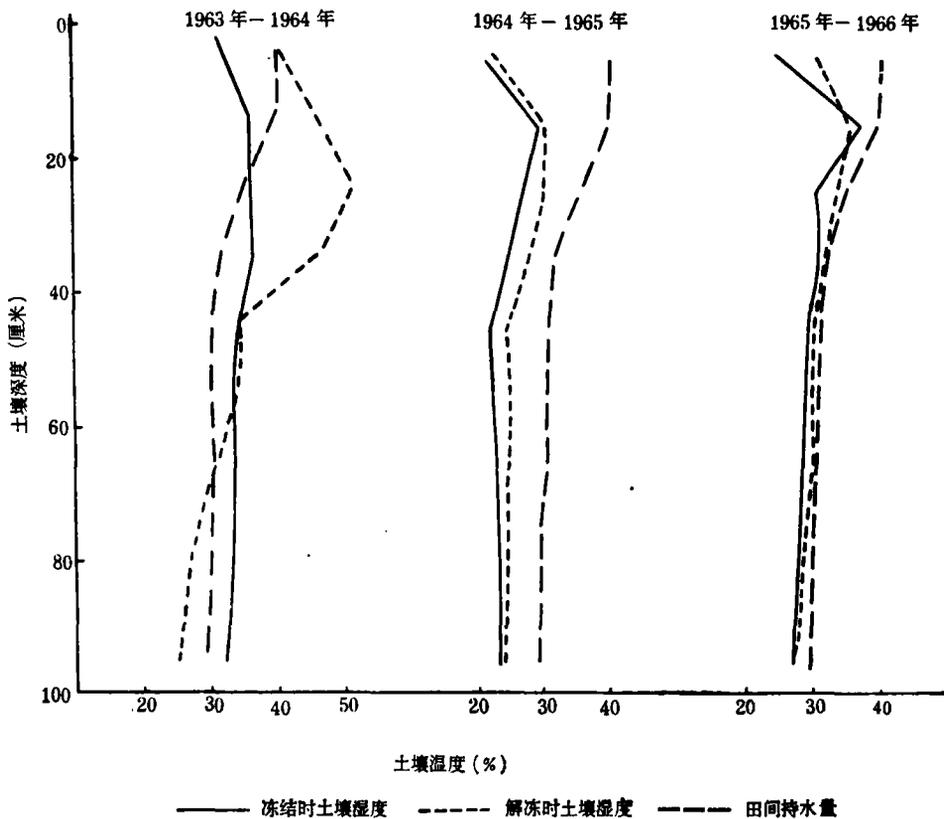


图 2 冻结过程中水分在垂直方向上的移动与土壤湿度水平的关系

从图 2 和表 7 可以看出：首先,不论土壤冻结时湿度水平如何,冻结过程中 1 米土层的水量均有不同程度的增加,其增加量约为 10—40 毫米。其次,只有当土壤湿度水平超过田间持水量时,冻结过程中水分在垂直方向上的再分配才有最强烈的表现。正如图 2 中所示,1963—1964 年度土壤冻、融前后的湿度剖面有了很大变化,0—50 厘米的土壤湿度由于下层土壤水分的上移而上升至 45—50%,50 厘米以下土层由于水分减少使土壤湿度下降至 25—30%。然而冻结过程中水分的大量移动并不发生在土壤湿度低于田间持水量的情况下。这种现象可能说明当土壤湿度大于田间持水量时在温度梯度或冻结作用影响下的水分移动主要是液态的,而在土壤湿度较低时,水分的汽态凝结可能是主要的。

当冻结时土壤湿度大于田间持水量,由于冻结过程中大量水分集聚在 50 厘米以上土层,翌春化冻时可在该深度内出现多量自由重力水,造成所谓土壤“反浆”,给田间作业带来一定麻烦。如果冻结时土壤湿度低于田间持水量,翌年春季将不会有“反浆”现象出现。

## 摘 要

田间观测比较证实:耕地黑土的水分状况和农田水分循环过程不仅受气候因素所控制,同时也明显受作物种类不同所影响。因此,不同作物下黑土农田的水分状况,表现在土壤湿度水平、各水分时期出现时间、作物收获后残留土壤中的水量等方面均有明显区别。小麦地蒸发强度大,蒸发高峰出现早且具有最大的年总蒸发量;大豆、玉米等中耕作物蒸发强度弱,蒸发高峰出现晚且具有较小的年总蒸发量。因此,在同一年里小麦地土壤湿度通常要比大豆、玉米地低,残留在土壤中的水分因而也最少。

## 参 考 文 献

- 中国科学院自然区划工作委员会编, 1959: 《中国气候区划》, 科学出版社。  
 中国科学院林业土壤研究所黑土工作队等, 1961: 东北北部黑土地区土壤耕作在抗旱保墒中的作用。土壤通报, 第 2 期, 36—40 页。  
 乔樵、沈善敏、周绍权, 1963: 东北北部黑土水分状况之研究 I. 黑土水分状况的基本特征及其与成土过程的关系。土壤学报, 第 11 卷 2 期, 143—158 页。  
 Абрамова, М. М., 1953: Передвижение воды в почве при испарении. Тр. Поч. Ин-т. им. В. В. Докучаева, Том. 41, Изд. АН СССР.

# STUDIES ON MOISTURE REGIME IN BLACK SOILS IN NORTHERN PART OF NORTH-EAST CHINA

## II. MOISTURE REGIME AND WATER CYCLES IN CULTIVATED BLACK SOILS

Qiao Qiao, Shen Shan-min and Zeng Zhao-shun  
(*Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica*)

### Summary

The water regime in cultivated black soils are not only influenced by the climatic factors, but also by the crops. In the black soils under different crops, there were obvious difference in the levels of soil humidity and the residual water in soils after harvest of crops. In wheat fields, an high evapotranspiration intensity with a peak which happened earlier and a maximum annual rate of evapotranspiration were found. But in fields of intertilled crops such as soybean and corn, the evapotranspiration intensity was lower, the evapotranspiration peak came later and the annual rate of evapotranspiration was smaller. In the same year, soil humidity in wheat fields was lower than that in soybean and corn fields, and the residual soil water in wheat field after harvest was the smallest.