

# 土壤冻结、消融期水盐动态的初步研究\*

方汝林

(中国科学院自然资源综合考察委员会)

季节性冻土对土壤盐碱化的影响,主要是发生在半湿润、半干旱和干旱区的温带至亚寒带地区,它包括了我国三北(西北、华北及东北)多数平原区。在三北平原地区,一般季节性冻土平均最大冻结深度为0.5—4.0米,冻土存在历时长达4—8个月之久。

对于土壤冻结和消融过程中的水盐运移规律,直至目前,研究得还不多。观测试验资料表明,在季节性冻土的影响下,构成了冬春季节特殊的土壤水盐运移和地下水状况,成为灌区土壤盐碱化的重要因素,尤其是对春季土壤返盐的发生和演变有着深刻的影响。本文根据内蒙古河套灌区观测试验资料,分析了土壤冻结、消融期水盐运移的规律以及控制春季土壤返盐的措施。

## 一、土壤冻结剖面的结构及其含水量的变化

内蒙古河套灌区,自11月下旬土壤开始冻结,于翌年2月下旬或3月初形成最大冻结深度,一般达0.8—1.2米;之后冻层开始消融,5月中旬消尽。在土壤冻结和消融过程中,土壤盐分进行了累积和再分配,并在春季4、5月形成土壤返盐,严重地影响农业生产。

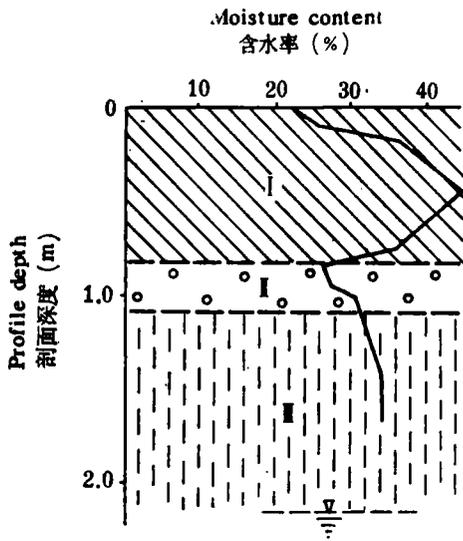
在土壤冻结的情况下,受低温冰冻的影响,使土壤水分状态发生很大的变化,土壤剖面可分为冻结层、似冻层和非冻层三部分(图1)。

在土壤冻结层内,地温始终处于负温状态,所以土壤中的水分多数已冰冻呈固态,同时因冻胀影响,土壤空隙体积也有所增加。因此,在有水份不断补给的情况下,可使冻层含水量达到“过饱和”状态。根据近年的观测资料,土壤冻结最大厚度为0.8—1.0米。冻层高含水量的位置是在40—70厘米之间,其含水率可达60% (以干土重表示,下同),这与0℃等温线在该深度范围持续时间最长有关。

处于冻结层下的似冻层,主要特点是地温经常处于0℃左右,它的厚度一般为0.2—0.3米。似冻层的位置,是随着气温降低、冻层厚度的增加而不断下移的。在土壤冻结过程中,似冻层的水分不断向冻层“补给”,故其含水量较低,为25—30%,小于或近于田间持水量。

处于似冻层下至地下水面间的非冻层,土壤均在0℃以上,土壤水为液态,含水率为28—33%。在有地下水补给的情况下,冻结剖面的含水量分布是呈现上下大中间小的分布状况,这完全不同于非冻期土壤剖面上小下大的含水量状况(图2)。

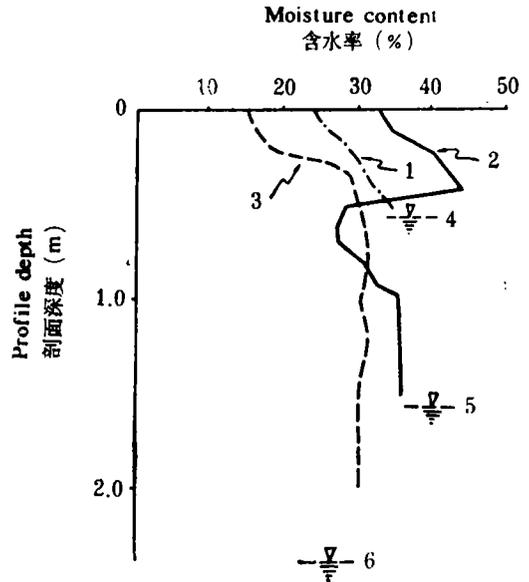
\* 王建平、刘俊峰、王升亮、吴坤荣、郭俊清同志参加协助观测、收集资料和电算工作;石玉林副研究员对本文提出宝贵意见,谨此感谢。



I 冻结层 Frozen layer  
 II 似冻层 Like-frozen layer  
 III 非冻层 Unfrozen layer

图 1 土壤冻结剖面结构与含水量状况(根据巴盟农业研究所观测资料编)

Fig. 1 The structure of frozen soil profile in relation to the moisture content (Data from Ba League Agricultural Institute)



1. 冻结前的土壤含水率 Soil water content before freezing period
2. 冻结期的土壤含水率 Soil water content during the freezing period
3. 解冻后的土壤含水率 Soil water content after thawing
4. 1978年11月6日地下水位 Ground water table on Nov. 6, 1978
5. 1978年12月13日地下水位 Ground water table on Dec. 13, 1978
6. 1979年5月16日地下水位 Ground water table on May 16, 1978

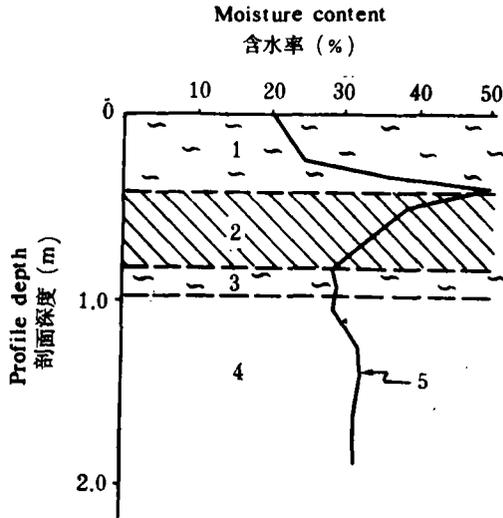
图 2 冻结期与非冻期的剖面水分状况 (根据巴盟农业研究所资料编)

Fig. 2 Water content in soil profile during the freezing period and non-freezing period (Data from Ba League Agricultural Institute)

自 2 月下旬或 3 月初,随着气温升高,土壤进入冻层消融阶段,至 5 月中旬冻层消尽为止。冻层消融从冻层的上部和下部开始,中间夹着一层未解冻层,由于未解冻层的阻隔,使上部消融的水分不能入渗,所以在未解冻层的上面,土壤水分常可达到过饱和状态(图 3),造成春季土地潮塌。

## 二、冻结期与消融期的土壤水量平衡

在地下水位较浅的条件下,冻结期和消融期的土壤水分状况与地下水位有密切的关系。图 4 表明,随着土壤结冻,地下水位迅速下降,这时,由于温度梯度的作用,地下水实际上不断地补充给土壤水,使冻层的土壤含水量增加。到了 2 月底 3 月初,冻层开始消融,地下水也逐渐回升,这时,实际上也有一部分土壤水回渗到地下水中。



- 1. 上部消融层 Upper thawing layer
- 2. 未解冻层 Frozen layer
- 3. 下部消融层 Lower thawing layer
- 4. 非冻层 Unfrozen layer
- 5. 融冻期土壤含水率 Moisture content during the thawing period

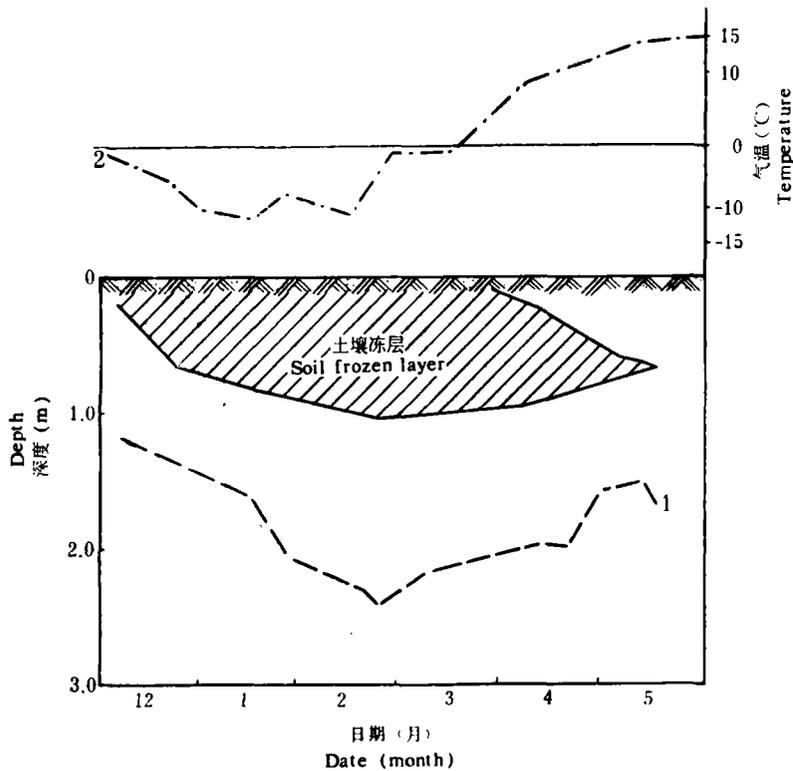
图 3 融冻期的土壤剖面及含水率分布(根据巴盟农业研究所观测资料编)  
Fig. 3 Water content in soil profile during the thawing period

表 1 土壤冻结、消融期地下水位变化

Table 1 Variation of ground water table during the freezing and thawing periods of soils

观测井 Observation well	地下水埋深 (m) Depth of ground water table			冻结期地下水位 下降值 (m) Decreased value of ground water table in freezing period	消融期地下水位 回升值 (m) Increased value of ground water table in thawing period	总下降值 (m) Total decreased value
	1977年11月20日 On Nov. 20, 1977	1978年3月5日 On March 5, 1978	1978年5月15日 On May 15, 1978			
10	1.70	2.45	1.72	0.75	0.73	0.02
13	1.50	2.37	1.76	0.88	0.61	0.27
22	1.50	2.62	2.05	1.12	0.57	0.55
26	1.70	2.48	2.10	0.78	0.38	0.40
27	1.40	2.02	1.49	0.62	0.53	0.09
31	1.15	2.20	1.52	1.05	0.72	0.33
32	1.53	2.40	1.60	0.87	0.80	0.07
33	1.45	2.60	1.60	0.95	1.00	-0.05
34	1.30	2.77	1.95	1.47	0.82	0.65
35	1.50	2.90	2.20	1.40	0.70	0.70
36	2.00	2.80	2.46	0.81	0.35	0.46
38	1.60	2.84	2.54	1.24	0.30	0.94
平均 Mean value				1.00	0.63	0.37

通过在河套灌区下游长胜六、七队 4470 亩平衡区地下水量变化以及土壤水量变化的初步分析,上述地下水和土壤水互相补充的情况可以得到证明。这个平衡区自 1978 年 1



1. 地下水位变化 The variation of ground water table
2. 气温变化 The variation of temperature

图 4 土壤冻结期和消融期地下水位和冻层变化

Fig. 4 Variation of ground water table and frozen layer during the freezing and thawing periods of soils

月 6 日至 3 月 3 日冻结期内,地下水储量减少了 9.45 万立方米,同期,侧向流入量与侧向流出量之差约 2 万立方米。所以,该时段垂直消耗的水量,应为上述两项水量之和,即 11.45 万立方米,约合 38.4 毫米水厚。土壤平均冻结厚度一般为 0.8 米,假设 38.4 毫米的水量全部补给并聚存于冻层,可使冻层含水率增加 5% 左右。这一数值与实际观测到冻层含水量的增加值基本相当。据平衡区内二个冻土含水率观测点的资料,3 月 6 日 0.8 米冻层的含水率比 1 月 3 日的含水率分别增加了 3.4% 和 7.5%。这证明了土壤冻结期地下水位大幅度下降,并不是地表蒸发或地下径流排泄造成的,而是由于地下水不断补给冻层并储存于冻层内的结果。

在土壤冻层消融期,冻层的消融是在冻层上下同时进行的,处于中间的未解冻层起了“隔水”作用,上部消融层内的土壤水,主要消耗于地表蒸发,使土壤水分减少。而冻层下部,消融的水分则下渗补给了地下水,使地下水位回升。

在土壤冻层消融期,自 1978 年的 3 月 3 日至 5 月 18 日,平衡区地下水储量增加了 6.92 万立方米,侧向流入量和侧向流出量之差为 0.39 万立方米。所以,在平衡区地下水储量的增加量中,扣除 0.39 万立方米的水量是由侧向地下径流补给以外,其余的 6.53 万立方米,约 21.9 毫米水厚的水量应该是由垂直渗入补给的。因为该时段内既无降雨补给,

表 2 冻结期土壤盐分变化

Table 2 Variation of salt content in the freezing period of soils

观测点 Observation site	取样深度 (cm) Sampling depth	冻结初期全盐(%) Total salt in the beginning of free- zing period	冻结末期全盐(%) Total salt in the end of freezing period	全盐增加值(%) Increased value of total salt	积(脱)盐率(%) Desalinized ratio
I	0—20	0.244	0.580	0.336	-137.7
	20—40	0.170	0.360	0.190	-111.8
	40—80	0.158	0.230	0.072	-45.6
	80—160	0.107	0.115	0.008	-7.5
II	0—20	0.136	0.167	0.031	-22.8
	20—40	0.095	0.106	0.011	-11.6
	40—80	0.095	0.187	0.092	-96.8
	80—160	0.146	0.126	-0.020	13.6

注：根据巴盟农业研究所观测资料编。

Data from Ba League Agriculture Institute.

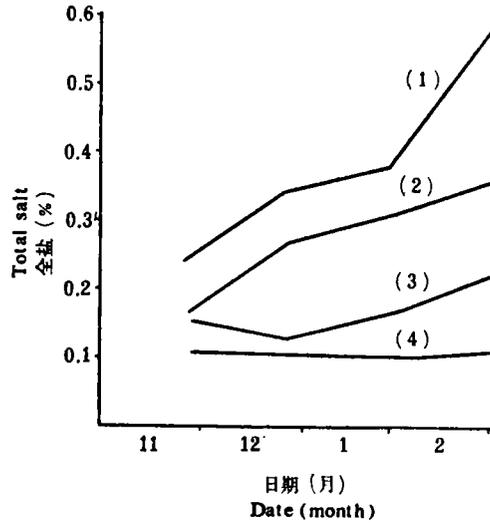
也无灌溉水补给,所以这时期地下水储量的增加,主要是融冻水回渗补给的结果。21.9 毫米水厚约相当于 3% 的冻层土壤含水率,而在该时段内,两个观察点 0—80 厘米土层的含水率分别减少了 5.2% 和 7.1%,所以回渗到地下水的水量只是融冻水的一部分,约为融冻水的 40—60%。此外,我们根据平衡区 12 个地下水位观测点的资料(表 1):冻结期地下水位平均下降了 1 米,消融期水位平均回升 0.63 米,实际上平均下降了 0.37 米,这一水量,可以认为是这一期间蒸发的消耗。

### 三、土壤冻结、消融期的盐分累积与再分配

在土壤非冻结的情况下,土壤剖面中的盐分是随着液态水分运移而迁移着;当土壤水分处于蒸发或汽化时,盐分将累积于水分蒸发或汽化的土壤剖面内。但是,在土壤冻结时,地下水和土壤中的盐分,在非冻层内随毛管水向上运移,多数盐分便随着土壤水冻结而累积于冻层内。由于似冻层是随着冻层厚度的增加而逐步下移的,所以这时盐分是较均匀地分配于整个冻层剖面中。

由表 2 可看出,在土壤冻结厚度最大时(3月5日),80 厘米土层内的各层土壤盐分,都比封冻初期有了显著的增加。在含盐量较重的“I”观测点,土壤冻层积盐率达 45.6—137.7%;在含盐较轻的“II”观测点,土壤冻层积盐率为 11.6—96.8%。但是,这一时期内非冻层 80—160 厘米的土壤含盐量没有明显的变化。

观测资料还反映出在土壤冻结的情况下,冻层内的盐分还有向冻层上部运移累积的趋势,这一现象以 I 观测点表现得最明显。在整个土壤冻结期,0—20 厘米冻层中的盐分,无论是积盐速度还是积盐量,都比其它各层高得多(图 5)。这说明冻结期间土壤中仍有液态水存在,并且在温度梯度的作用下运动得相当快。同时这些液态水可能以薄膜水的形态存在,其水膜厚度由下而上逐渐变薄,因此水分在冻层内运移也由下而上进行<sup>[3]</sup>。盐分随着薄膜水向冻层上部运移,从而增大了上部冻层盐分累积速度和累积量。



- (1) 0—20 厘米土壤盐分  
Salt content of soil in the depth of 0—20 cm
- (2) 20—40 厘米土壤盐分  
Salt content of soil in the depth of 20—40 cm
- (3) 40—80 厘米土壤盐分  
Salt content of soil in the depth of 40—80 cm
- (4) 80—160 厘米土壤盐分  
Salt content of soil in the depth of 80—160 cm

图 5 冻结期土壤盐分变化

Fig. 5 Variation of salt content in soil during the freezing period

表 3 消融期土壤盐分变化

Table 3 Variation of salt content in the thawing period of soils

观测点 Observation site	取样深度 (cm) Sampling depth	融冻初期全盐(%) Total salt in the beginning of thawing period	融冻末期全盐(%) Total salt in the end of thawing period	全盐增减量(%) Variation of total salt	积(脱)盐率(%) Desalinated ratio
17	0—20	0.160	0.530	0.370	-231.3
	20—40	0.140	0.140	0	0.0
	40—100	0.190	0.170	-0.020	10.5
63	0—20	0.150	0.190	0.040	-26.7
	20—40	0.140	0.110	-0.030	21.4
	40—100	0.150	0.130	-0.020	13.3
227	0—20	0.210	0.500	0.290	-138.1
	20—40	0.240	0.180	-0.060	25.0
	40—100	0.320	0.130	-0.190	59.4

注: 内蒙古水文地质大队资料(1963年观察)。

Data from Hydrogeological Investigation Team of Innermongolia.

在土壤冻层消融期,随着冻层的消融和融冻水的回渗与蒸发,使土壤盐分又进行一次再分配。冻层中的盐分,一部分随融冻水回渗入地下水中,或者使下部土壤的盐分增

加;而另一部分随着融冻水蒸发而累积于土壤表层,且主要累积于0—5—10厘米的土层内。由于这两种盐分的再分配,使土壤盐分状况发生很大的变化。

由表3可看出,土壤冻层消融初期至消融中后期,20—100厘米土层内盐分都减少了很多,脱盐率为10—60%;而表层0—20厘米内的盐分却增加了26%以上,造成严重返盐。因此,春季土壤返盐,是冻结层土壤盐分再分配的结果,它实际上和冻结期冻层盐分积累有很密切的关系;而冻层盐分的积累,又和冻前地下水位的埋深和矿化度有很密切的关系。

#### 四、调控冻结前的地下水位是防治春季土壤返盐的关键

河套灌区是一个干旱地区,地下水的补给主要是灌溉水的渗漏。灌区地下水位的动态,是随着土地灌溉情况而变化的。就一年中的灌溉情况,主要可分为作物生长期灌溉和夏秋收后的秋季贮水灌溉。自5月中旬至9月份为作物生长期灌溉,用水量占全年用水量的60%左右,地下水埋深一般为1.2—1.5米,在频繁的灌溉淋洗下,灌溉土地总的趋势是处于脱盐的状态。夏秋收后的秋季贮水灌溉,是使翌年春季有适宜的土壤水分,确保春耕播种的必要措施。秋季贮水灌溉开始于10月中下旬,结束于11月初,历时15—20天。由于秋季贮水灌溉用水集中、量又大(用水量占全年用水量的40%),所以贮水灌溉后地下水位迅速上升,于11月中旬形成全年最高地下水位,且持续时间长,一般埋深为0.5—1.0米,灌溉地段小于0.5米,甚至近于地面。

在土壤冻结期,土壤冻层中含水量增加多少,直接与封冻前地下水位高低有关。根据巴盟农业研究所和长胜试验站七个观测点资料的分析(图6),可看出封冻前地下水埋深

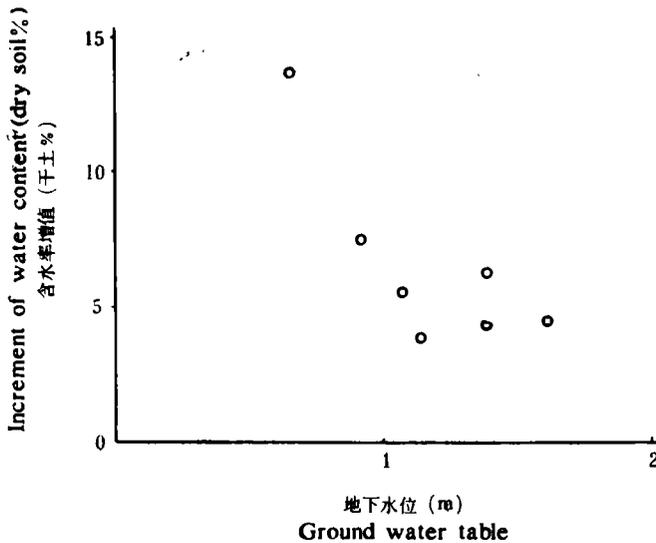


图6 冻层含水率增值(干土%)与封冻前地下水埋深关系

Fig. 6 The increment of water content in frozen layer (dry soil%) in relation to the depth of ground water table before freezing period

越浅, 冻层含水量增加得越多; 反之, 封冻前地下水埋藏越深, 冻层水分增值也越小。所以, 控制冻层中水盐的累积, 关键在于降低封冻前的地下水位。

为研究防治春季土壤返盐的途径, 自 1975 年以来在灌区下游长胜试区进行了调控封冻前地下水位的试验, 分竖井排水和井渠结合二种类型, 经几年来的实践, 都取得了良好的效果。

竖井排水调控试验布设在长胜试区杨树耗生产队范围内, 面积 5100 亩, 其中耕地面积 2244 亩。自 1975 年排水以来, 历年主要在秋季 9 月下旬至 11 月下旬进行排水, 每年排水总量 43—59 万立方米, 在这样的排水条件下, 加快了秋季贮水灌溉后地下水位高峰的下降速度, 一般至土地封冻时 (11 月下旬) 都能将试区地下水位调控到 1.7—2 米左右。

随着封冻前地下水位的降低, 试区土地也由积盐的状态转化为脱盐的过程。例如, 以 1976 年 11 月调查资料与试验前 1974 年 9 月调查资料相比较, 由原来重盐土脱盐为中盐土的面积有 293 亩, 由中盐土脱盐为轻盐土的面积有 187.5 亩, 由轻盐土变为心底土盐碱的面积有 55.5 亩, 由重盐土脱盐到轻盐土的面积有 22.5 亩。以上各种盐土脱盐的面积共计 558.5 亩, 占控制面积的 12%。原来在 2244 亩的耕地中, 多数耕地捉苗率不足 60—70%。经历四年排水, 1979 年春季全部耕地捉苗率均在 80% 以上, 其中捉苗率在 90% 以上的占耕地总面积的 90%。根据 35 个定位观测点资料的统计, 一米土层呈现脱盐的观测点约占 80%。其中盐分降低比较显著的, 是在那些灌溉的荒地、撩荒地以及耕地中的盐斑地。灌溉的荒地和撩荒地, 一米土层脱盐率为 15—50%; 灌溉盐斑地一米土层脱盐率为 40% 左右, 0—20 厘米土层脱盐率达 80%<sup>[2]</sup>

井渠结合的调控试验, 布设在长胜试区六、七生产队范围内, 1977 年试验控制面积为 2100 亩, 1978 年扩大为 4566 亩。试验中, 作物生长期仍以黄河水灌溉, 仅夏秋收后以井水代替黄河水进行贮水灌溉。

在井渠结合试区, 地下水不仅失去渠水灌溉渗漏补给, 而且又被抽取灌溉土地, 使地下水位自 9 月下旬以后一直持续下降。至封冻时全试区平均地下水埋深都调控到 1.7 米<sup>[4]</sup>。

随着封冻前地下水位的降低, 试区土壤盐分也减少了很多, 例如处于试区最低洼盐碱最重的“红圪卜”地区, 土壤盐分都有了显著的减少, 0—20 厘米土壤含盐量减少了 19—85%, 平均减少了 50.3%; 0—80 厘米土壤含盐量减少了 12.5—61%, 平均减少了 36.5%。耕地中的盐碱地少了许多, 盐斑面积由原来的 20.5% 降低为 3.2%, 严重缺苗面积由原来的 32% 降低为 15.3%, 全苗面积由原来的 47.5% 上升为 81.5%。此外, 井渠结合降低地下水位的效应, 由于减少了土壤含水量, 也反映在全试区土地面貌的变化上, 过去那种道路翻浆、耕地潮塌的现象不见了。可见, 控制和降低土壤封冻前的地下水位, 是河套灌区防治土壤盐碱化的一个很重要的措施。

## 五、结 语

通过分析, 不难看出季节性冻土的发生和演化, 是制约这些地区冬春季节水盐运移的主要因素, 并构成了冬春水盐运移的特殊形式。在土壤冻结期, 随着土壤冻结水盐开始不

断的累积于冻层内；当进入冻层消融期，随着冻层的消融，一部分融冻水和盐分回渗进入地下水中；另一部分融冻水消耗于蒸发，而使盐分累积于土壤表层，形成春季返盐。所以，春季返盐的实质，是冬季累积于冻层内的盐分再分配的结果。因此，防治春季土壤返盐的关键，是在于减少冻层内盐分的累积。根据冻层内水盐累积与封冻前地下水位关系的分析，并通过实际调控试验，证实了将封冻前地下水位调控到 1.5—2.0 米以下，就可显著的减少土壤冻结过程中的盐分累积，达到防治春季土壤返盐的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 方汝林, 1981: 井渠结合改良盐碱的效果。农田水利与小水电, 第 2 期, 23—27 页。  
 [2] 长胜试验站, 1979: 井灌井排。盐渍土改良论文选, 407—430 页, 山东科学技术出版社。  
 [3] 张倬元等, 1964: 工程动力地质学。166—172 页, 中国工业出版社。

## PRELIMINARY STUDY ON THE DYNAMICAL REGIME OF WATER AND SALT DURING THE FREEZING AND THAWING PERIOD OF SOIL

Fang Ru-lin

(Committee of Comprehensive Investigation on Natural Resources, Academia Sinica)

### Summary

Data of observation indicated that the genesis and evolution of the seasonal frozen soil was the main factor to restrain the movement of water and salt in winter and spring which constituted the peculiar pattern of water and salt movement in soil. During the soil freezing period, soil salt was accumulated in the frozen soil layer with the freezing of the soil. While in spring with the thawing of frozen soil layer, a part of thawing water and salt infiltrated into the ground water, another part of the water was evaporated and salt was accumulated in the surface soil.

Therefore the accumulation of salt in the surface soil in spring is actually the result of redistribution of salts in frozen soil layer accumulated in winter.

According to the results of the study on relationship between the accumulation of salt in frozen soil layer and the ground water table at the beginning of frozen period and experiments, it is proved that if the ground water table is controlled below 1.5—2.0 m before frozen period, the accumulation of salt is decreased significantly in the process of soil freezing, the accumulation of salt in the surface soil in spring then can be prevented.