

# 田块尺度下冻融前后土壤剖面盐分空间变异性研究

李宝富<sup>1,3</sup>, 熊黑钢<sup>2,3</sup>, 龙桃<sup>1,3</sup>, 张建兵<sup>1,3</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学 应用文理学院, 北京 100083; 3. 新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**为明确冻融过程对土壤盐分分布的影响,通过野外采样、室内分析的方法对比分析了奇台县农田冻融前、后土壤含盐量的空间变异性。结果表明:(1)冻融前,表层(0–20 cm)土壤含盐量(0.11%)最低,且基本随着土层深度的增加土壤含盐量逐渐增大。而土壤盐分空间分布的复杂性基本随着土层深度的增加逐渐减小。(2)冻融后,表层(0–20 cm)含盐量(0.14%)变为最高。春季积盐现象明显(主要发生在60 cm深度以上),但尤以表层最为严重(积盐率达30.0%)。模拟秋季灌溉洗盐效果显著,剖面平均(100 cm深度以上)含盐量减少率为8.16%。而且洗盐深度大于100 cm。另外,各层土壤含盐量的变异性(中等变异性)未变,但变异系数增大(除40–60 cm深度外)。剖面上部土壤盐分的理论模型由指数模型为主均变为高斯模型,且变程增大明显;而底部由高斯模型转为球状模型,且变程变化不大。

**关键词:**冻融前后; 土壤盐分; 空间变异

中图分类号:S156.4<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)04-0140-05

## Study on the Spatial Variability of Soil Salt Content Fore-and-aft Freezing in the Farmland of Qitai County

LI Bao-fu<sup>1,3</sup>, XIONG Hei-gang<sup>2,3</sup>, LONG Tao<sup>1,3</sup>, ZHANG Jian-bing<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Department of Urban Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology in Xinjiang, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of freezing process on soil salinity distribution, the paper analyzed comparatively the spatial variability of salinity before and after freezing on the farmland in Qitai by taking samples in the open field and researching in the lab. The results show that before the freezing, soil salt content (0.11%) of surface layer (0–20 cm) is minimum, soil salt content tends to increase with soil depth while the complexity distribution of soil salt content tends to decrease. After the freezing, soil salt content (0.14%) of surface layer is maximum, which indicates that soil salt accumulation rate (30.0%) at the surface layer is significant in spring while soil salt desalination rate is obviously in fall with decreasing 8.16% of salt content in profile (over 100 cm depth), soil salt desalination depth is beyond 100 cm. In addition, variability of salt content of every soil layers remains unchanged, but the variation coefficient increases (except for 40–60 cm). Theoretic model of soil salt content on the upper profile varied from Index model to Gauss model with obvious increase, but the bottom section is from Gauss model to Bartlett model with little change.

**Key words:** fore-and-aft freezing; soil salt content; spatial variability

土壤冻融过程中,土壤盐分在垂直剖面上的动态变化规律复杂多样。而且其造成的盐碱化对作物的危害十分严重<sup>[1-2]</sup>。因此,引起国内外众多学者的广泛关注。国外对土壤冻融的研究多侧重于融雪水的入渗<sup>[3-6]</sup>,而国内的起步则较晚。20世纪80年代以

来,许多研究者在冻融条件下水盐运移规律、冻融土壤特征曲线、地下水埋深和地表不同覆盖对季节性冻融土壤入渗规律的影响、冻融期气温与土壤水盐运移特征以及水–热–盐耦合及预测模型等方面做了较多研究<sup>[7-16]</sup>。20世纪70年代以来,土壤特性的空间

收稿日期:2011-01-04

修回日期:2011-03-04

资助项目:国家自然科学基金(40771194);北京市属高等学校人才强教计划资助项目(PHR200906125)

作者简介:李宝富(1983–),男,山东临沂人,硕士,主要从事区域可持续发展研究。E-mail:lb0102@sohu.com

通信作者:熊黑钢(1956–),男,教授,博士,现主要从事干旱区研究。E-mail:xhg1956@sohu.com

变异或其它农田特征变异定量化研究一直是关注的热点<sup>[17]</sup>。多数学者着重讨论了土壤物理性质、土壤水分和盐分在非冻融期的空间变化问题,均取得一定的成果<sup>[18-20]</sup>。目前,对冻融期土壤含盐量的空间变异研究,特别是结合秋浇,讨论盐分在冻融季节的变化规律、脱盐、积盐状况等方面尚需深入研究。

本文通过对比研究冻融前(秋灌前)、后土壤盐分的空间变异性及其变化特征,可为合理灌溉、防止次生盐渍化及土地资源的利用管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

新疆奇台县位于天山北麓,准噶尔盆地东南缘,地处东经  $89^{\circ}13' - 91^{\circ}22'$ , 北纬  $43^{\circ}25' - 49^{\circ}29'$ , 全县面积  $1.93 \text{ 万 km}^2$ , 其中山地、丘陵占  $31.4\%$ , 平原占  $15.04\%$ , 沙漠、戈壁占  $53.56\%$ 。农区年平均气温为  $4.7^{\circ}\text{C}$ , 7 月极端最高气温  $43^{\circ}\text{C}$ , 1 月极端气温为  $-42.6^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量为  $176 \text{ mm}$ , 蒸发潜力  $2141 \text{ mm}$ , 无霜期平均  $156 \text{ d}$ , 年日照时数  $2840 \sim 3230 \text{ h}$ 。夏季炎热, 冬季寒冷, 四季分明, 属于中温带大陆性干旱气候。

研究区位于古尔班通古特沙漠边缘的奇台县一中万木春林场。这里处于绿洲与沙漠交错地带, 土壤盐渍化严重, 土壤 pH 值较高 ( $> 8.0$ ), 碱性较强。土壤质地为砂土。耕层有机质平均含量  $29 \text{ g/kg}$ , 全氮含量  $1.4 \text{ g/kg}$ , 全磷含量  $1.1 \text{ g/kg}$ 。目前非灌溉期地下水位一般在  $1.1 \sim 4.0 \text{ m}$ 。地下水平均矿化度为  $2.2 \text{ g/L}$ , pH 值为  $7 \sim 8$ 。植物群落结构简单, 覆盖度不高, 以梭梭 (*Haloxyylon ammodendron*)、红柳 (*Tamarix chinensis* Lour)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*)、花花柴 (*Karelinia caspica*)、猪毛菜 (*Salsola collina*) 等旱生耐盐植物为主。

## 2 材料与方法

2008 年 9 月 26 日(冻融前), 在农田选择  $6 \text{ m} \times 80 \text{ m}$  的试验区, 以  $2 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  为间距, 用土钻法采集 36 个土壤剖面, 并对打钻点位进行准确标记。每一剖面以  $20 \text{ cm}$  为一层, 分别在  $0 \sim 20$ ,  $20 \sim 40$ ,  $40 \sim 60$ ,  $60 \sim 80$ ,  $80 \sim 100 \text{ cm}$  五个层次取样。9 月 27 日, 对试验区进行了秋灌, 灌水量为  $264 \text{ m}^3$ , 即  $5500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。这是为了模拟新疆农田常用的灌溉方法——大水漫灌, 以便使研究结果更符合实际。2009 年 4 月 10 日(冻融后), 分别在原有标记点附近进行取样, 采样方法同冻融前。两次取样共采集 360 个样品。采集的土样在实验室内自然风干、分散、过  $1$

$\text{mm}$  筛。将制备好的土壤样品以  $1:5$  土水比制备成浸提液, 用残渣烘干法测定可溶性总盐含量。

本文试验数据主要运用地统计学方法进行统计分析。并通过狄克松(Dixon)法,  $P=0.01$  水平下的异常值检验。绘图及分析主要在 Surfer 8.0 和 GS+V7 等软件上进行。

地统计学是研究区域化变量空间分布结构特征规律的有效手段, 它的基本工具——变异函数可以反映和刻画区域化变量的许多性质<sup>[21]</sup>。理论变异函数的模型有 3 个重要的参数, 其中块金常数  $C_0$  的大小可反映区域化变量随机性大小; 基台值  $C_0 + C$  可以反映变量变化幅度或系统的总变异程度; 变程  $a$  表明变量自相关变化的尺度。块金值与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比列, 可反映变量的空间相关程度。当比例小于  $25\%$ , 说明变量具有强烈的空间自相关性;  $25\% \sim 75\%$  之间, 变量具有中等的空间相关性, 大于  $75\%$  时, 变量空间相关性很弱<sup>[18]</sup>。

一般对变异系数  $C_v$  值的评估如下: 当  $C_v \leq 0.1$  时, 称弱变异性; 当  $0.1 < C_v \leq 1.0$  时, 称中等变异性; 当  $C_v > 1.0$  时, 呈强变异性<sup>[22]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 冻融前、后剖面土壤盐分统计特征

冻融前,  $0 \sim 40 \text{ cm}$  深度土壤盐分服从对数正态分布, 而  $40 \text{ cm}$  以下各层及剖面平均土壤含盐量均服从正态分布(表 1), 表明所测数据均满足地统计学分析的要求。土壤含盐量以表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )最低,  $60 \sim 80 \text{ cm}$  深度最高。除  $80 \sim 100 \text{ cm}$  深度外, 其它各层盐分含量均随土层深度的增加而逐渐增大。这主要是因为农田经多年耕作、多次灌溉, 表层脱盐效果最好。

各层及剖面平均土壤含盐量的变异系数较大, 介于  $0.37 \sim 0.83$  之间, 均属中等变异性。另外,  $0 \sim 40 \text{ cm}$  深度的土壤盐分的变异系数明显高于  $40 \text{ cm}$  深度以下, 表明前者的变异性高于后者。

冻融后, 各层及剖面平均土壤含盐量的分布类型未变(表 1)。表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )土壤含盐量由最低(冻融前)转为最高, 表明冻融过程中, 盐分的表聚现象明显。而其它各层及剖面平均土壤含盐量均呈减少趋势, 说明秋灌洗盐效果显著。

各层及剖面平均土壤含盐量的变异性未发生变化, 但变异系数均增大(除  $40 \sim 60 \text{ cm}$  深度外)。体现了冻融季节土壤盐分的再分配加大了盐分的变异程度。另外,  $40 \text{ cm}$  深度以下的土壤含盐量仍低于  $40 \text{ cm}$  深度以上。

表 1 土壤盐分的统计特征值

深度/cm	分布类型		标准差		变异系数	
	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后
0- 20	对数正态	对数正态	0. 08	0. 11	0. 71	0. 80
20- 40	对数正态	对数正态	0. 11	0. 11	0. 83	0. 96
40- 60	正态	正态	0. 09	0. 07	0. 56	0. 52
60- 80	正态	正态	0. 08	0. 07	0. 45	0. 51
80- 100	正态	正态	0. 06	0. 05	0. 37	0. 40
剖面平均	正态	正态	0. 07	0. 07	0. 48	0. 53

3.2 冻融前、后土壤盐分的变化特征

冻融后,剖面平均土壤含盐量减少量为 0. 012% (表 1),减少率达 8. 16%。表明秋季大水漫灌对于土壤春季返盐有明显的抑制效果。

冻融前后,各层土壤含盐量的变化各不相同(图 1)。冻融后,表层(0- 20 cm)土壤含盐量增加 0. 033%,积盐率达 30. 0%。而 20 cm 以下各层土壤积盐率均为负值。表明春季土壤返盐以表层(0- 20 cm)最为强烈。另外,60 cm 深度以上各层土壤含盐量减少率明显低于 60 cm 深度以下。其中,60- 80 cm 深度的土壤含盐量(0. 141%)最高,而其减少率也最大,为 20. 79%(图 1)。一方面可推知,返盐现象主要发生在 60 cm 以上;另一方面表明,秋季灌溉的洗盐效果显著,洗盐深度大于 100 cm。

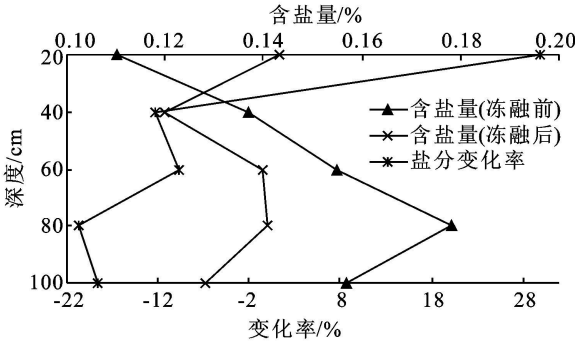


图 1 冻融前、后各层土壤含盐量及其变化率

3.3 冻融前、后土壤含盐量的空间变异特征

3.3.1 剖面平均土壤含盐量的空间变异性 冻融前后,剖面平均土壤含盐量的理论模型均为高斯模型(表 2)。其  $Co/(Co + C)$  值小于 25%,表明具有强烈的空间自相关性。土壤含盐量的变程变化(0. 21)较小。说明其自相关距变化不大。

分维数  $D$  的大小,表示变异函数曲线的曲率,  $D = (4 - m)/2$ ,式中,  $m$  为变异函数  $\lambda(h)$  和抽样间距  $h$  双对数线性回归的斜率,  $D$  随着变异函数对数曲线斜率的增加而减少,斜率越陡( $m$  越大),  $D$  越小,格局变异的空间依赖性越强,反之,由随机因素引起的异质性占有较大的比重<sup>[19]</sup>。冻融后,剖面平均含盐量的分维数均略有减小(0. 02),但冻融前后的分维数均大于 1. 90,一方面说明随机因素的影响作用稍减,因为

冻融前,受人类活动(如灌溉、耕作及管理方式等)和植被等因素的影响较大;另一方面表明其空间分布由随机因素引起的空间异质性较大。

3.3.2 剖面各层土壤含盐量的空间变异性 冻融前,剖面上部(60 cm 以上)土壤含盐量(除 0- 20 cm 外)主要为指数模型,而剖面下部(60- 100 cm)为高斯模型。20- 40 cm 土壤含盐量具有中等空间自相关性,而其它各层土壤含盐量均具有强烈的空间自相关性。各层土壤含盐量的变程不大,介于 2. 13~ 12. 14 m 之间。但 60 cm 深度以上(> 5. 2 m)土壤含盐量的变程明显大于 60 cm 深度以下(< 2. 6 m),一是因为剖面下部土壤内部结构的变化较为复杂多样,二是人类灌溉、耕种等活动对剖面上部的影响强度大于下部,从一定程度上削弱了土壤盐分分布的变异性。

0- 40 cm 深度的土壤含盐量的分维数( $\leq 1. 87$ )明显小于 40 cm 深度以下( $\geq 1. 94$ )。其中,以 20- 40 cm 深度土壤含盐量的分维数(1. 82)最小,60- 80 cm 深度的分维数(1. 98)最大。反映出剖面上部由随机性因素引起的空间异质性大于下部。

以上结果显示,土壤含盐量的变程与分维数的大小呈现相反的变化态势。土壤内部结构越复杂,土壤含盐量的空间自相关距就越小,而其分维数就越大。

冻融后,剖面上部(0- 80 cm)土壤含盐量均变为高斯模型,而底部(80- 100 cm)转为球状模型。土壤含盐量的中等空间自相关性由 20- 40 cm 扩大至 0- 40 cm。而其它各层的土壤含盐量仍具有强烈的空间自相关性。40 cm 深度以上的土壤含盐量的变程明显增加,其中以表层(0- 20 cm)最为显著,近为冻融前的 6 倍,而 40 cm 深度以下变化较小。而且剖面上部(0- 40 cm)的土壤含盐量的变程明显大于下部(40- 100 cm),前者为后者的 7~ 20 倍。一方面由于冻融季节人类停止干扰活动(如灌溉、耕作等管理方式),剖面上部受到人类活动等各种随机性因素的影响减弱程度高;另一方面因为冻融后积雪融水在入渗而带动盐分运移的过程中,削弱了剖面上部土壤盐分分布的差异性,对剖面下部的影响较小;而剖面下部随机性因素的作用强度变化相对较小,且土壤内部结

构性因素的变化也不大, 故其变程变化较小。有所减小, 但减小幅度( 介于 0~ 0. 02 之间) 不大, 表明随机性因素的影响强度稍减。

各层( 除 80~ 100 cm 外) 土壤含盐量的分维数均

表 2 土壤含盐量的理论半方差函数模型及其参数

深度/ cm	理论模型		Co/ Co+ C		变程 a		R <sup>2</sup>		分维数 D	
	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后	冻融前	冻融后
0- 20	球型	高斯	0. 001	0. 354	6. 56	38. 68	0. 58	0. 78	1. 87	1. 85
20- 40	指数	高斯	0. 280	0. 249	12. 14	45. 24	0. 90	0. 90	1. 82	1. 82
40- 60	指数	高斯	0. 220	0. 002	5. 26	2. 31	0. 55	0. 57	1. 95	1. 94
60- 80	高斯	高斯	0. 004	0. 001	2. 13	2. 33	0. 65	0. 59	1. 98	1. 98
80- 100	高斯	球型	0. 002	0. 114	2. 51	5. 69	0. 68	0. 63	1. 94	1. 97
剖面平均	高斯	高斯	0. 002	0. 002	2. 55	2. 34	0. 60	0. 67	1. 92	1. 90

3. 4 冻融前、后土壤含盐量的空间分布特征

利用克里格法对冻融前、后土壤剖面各层含盐量进行插值, 得到其二维空间分布图。各层土壤含盐量的等值线图直观地反映了其空间分布格局及其差异性( 图 2)。

冻融前, 土壤盐分的等值线的密集和复杂程度由大到小依次为: 20- 40 cm> 0- 20 cm> 40- 60 cm> 60- 80 cm> 80- 100 cm。基本随着土层深度的增加( 20- 40 cm 除外), 盐分空间分布的复杂性逐渐减弱。其中, 20- 40 cm 深度的土壤盐分的空间分布最为复杂, 等值线密集且出现多个封闭小圆, 表明盐分的分布随机性高, 出现的极值点多, 且相互之间存在较大差异, 从而导致其密集的等值线, 这也体现了其高空间变异性( 变异系数为 0. 83)。这可能是由于作物根系在此层对土壤盐分的吸收、吸附等重要作用,

致使其空间分布变化多端。表层( 0- 20 cm) 土壤盐分的等值线图较 20- 40 cm 深度稀疏, 但比 40 cm 深度以下各层密集。其中, 以底层( 80- 100 cm) 等值线最为疏散。原因是剖面上部( 40 cm 深度以上) 人类耕作活动、气候条件等随机性因素对盐分分布的影响强度较大, 而剖面下部( 40 cm 深度以下) 土壤内部结构起主导作用。另外, 表层在坐标值( 0- 30 dm, 30- 60 m) 范围内的等值线分布最为密集, 且含盐量较高, 这可能与微地形有关, 因为此坐标范围内的区域高于其它区域( 最大高度差约为 10 cm)。在坐标值( 0- 60 dm, 0- 20 m) 范围内, 40 cm 深度以上土壤含盐量明显小于其它区域。原因是此区域靠近灌溉入水口, 农田进行多次灌溉的水量大, 洗盐效果好。同时, 也进一步反映出人类的土地经营管理方式对土壤盐分空间分布的影响。

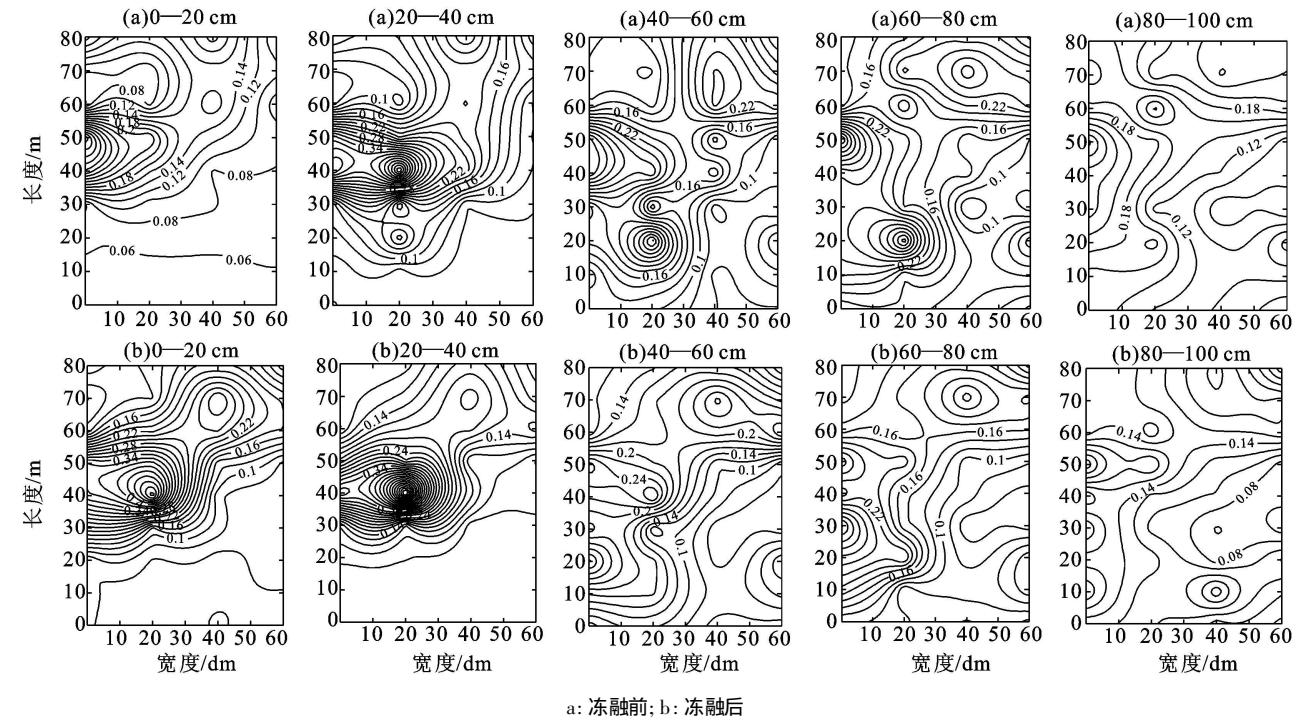


图 2 冻融前后土壤含盐量( %) 空间分布及等值线图

冻融后, 0- 20 cm 和 20- 40 cm 深度的土壤盐分在坐标值( 0- 60 dm, 20- 80 m) 范围内等值线的密集程度明显增大, 而在坐标值( 0- 60 dm, 0- 20 m) 范围内却减小。一方面说明当土壤含盐量较高时, 冻融季节虽然人类干扰活动减弱, 但其它外界气候条件等随机性因素增强, 致使剖面上部盐分的空间

分布更为复杂; 另一方面表明当土壤含盐量较低时, 冻融过程却使其分布差异性减小。但在 40 cm 深度以下, 各层土壤含盐量的等值线的密集和复杂程度减弱。一是因为冻融季节剖面下部没有人类灌溉等活动的影响; 二是由于外界气候等因子对其影响强度较弱。

## 4 结论

(1) 冻融前, 剖面上部(40 cm 深度以上) 土壤含盐量服从对数正态分布, 而下部(40 cm 深度以下) 及剖面平均土壤盐分均服从正态分布。由于多次灌溉洗盐效应, 各层(80–100 cm 深度除外) 土壤含盐量与土层深度成正比。各层土壤含盐量均属中等变异性, 且剖面上部的变异性显著高于下部。冻融后, 各层及剖面平均土壤含盐量的分布类型及变异性未变, 但变异系数增大(40–60 cm 除外)。

(2) 秋灌洗盐效果显著, 剖面平均土壤含盐量的减少率为 8.16%。洗盐深度超过 100 cm。春季返盐现象明显, 主要发生在 0–60 cm 深度。其中, 以表层(0–20 cm) 积盐现象最为严重, 积盐率达 30.0%。

(3) 冻融前, 土壤含盐量的理论模型由剖面上部的球状和指数模型转为下部的高斯模型。冻融后, 剖面中上部土壤含盐量均变为高斯模型, 底部转为球状模型。而剖面平均土壤含盐量的理论模型(高斯模型) 保持不变。土壤含盐量具有中等空间自相关性的层由 20–40 cm 扩大为 0–40 cm。而其它各层及剖面平均土壤含盐量的空间自相关性(强烈) 未变。剖面上部(40 cm 深度以上) 土壤含盐量的变程显著增大, 而下部变化不大。另外, 剖面平均及各层土壤含盐量的分维数稍减, 但减小幅度(介于 0~0.02 之间) 不大。

(4) 冻融前, 土壤盐分空间分布的复杂性(20–40 cm 除外) 与土层深度成反比。原因是剖面上部土壤盐分主要受人类活动(如耕作、灌溉方式等)、气候及微地形等随机性因素的影响, 而下部主控于土壤内部结构。冻融后, 剖面上部盐分较高区域(0–60 dm, 20–80 m) 土壤含盐量的等值线的密集及复杂程度增大, 而盐分较低区域(0–60 dm, 0–20 m) 及剖面下部均减小。

### 参考文献:

- [1] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展, 2005, 13(3): 298–302.
- [2] 龚家栋, 祁旭升, 谢忠奎, 等. 季节性冻融对土壤水分的作用及其在农业生产中的意义[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 328–333.
- [3] Zhao Litong, Gray D M. Estimating snowmelt infiltration into frozen soils[J]. Hydrological processes, 1999,

13: 1827–1842.

- [4] Klas H, Jirka S, Masaru M, et al. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze-thaw applications[J]. Soil science society of America, 2004(3): 693–704.
- [5] Flerchinger G N, Baker J M, Spaans E J A. A test of the radiative energy balance of the SHAW model for snow cover[J]. Hydrological processes, 1996, 10: 1359–1367.
- [6] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system: I. theory and developmet[J]. Trans. of the ASAE, 1989, 32: 565–571.
- [7] 王璐璐, 陈晓飞, 马巍, 等. 不同土壤冻融特征曲线的试验研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 1004–1011.
- [8] 陈晓飞, 都洋, 马巍, 等. 养分含量对土壤冻融特征曲线的影响[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 440–448.
- [9] 樊贵盛, 郑秀清, 潘光在. 地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的试验研究[J]. 水利学报, 1999, 30(3): 21–26.
- [10] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 70–74.
- [11] 王维真, 吴月茹, 晋锐, 等. 冻融期土壤水盐变化特征分析: 以黑河上游祁连县阿柔草场为例[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 268–274.
- [12] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 403–412.
- [13] 延耀兴, 郑秀清. 季节性冻融条件下草地入渗特性的试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 34–37.
- [14] 张立新, 徐学祖. 景电灌区次生盐渍化土壤冻融特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 512–516.
- [15] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 季节性冻融土壤水盐动态预测 BP 网络模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 125–128.
- [16] 李伟强, 雷玉平, 张秀梅, 等. 硬壳覆盖条件下土壤冻融期水盐运动规律研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 251–257.
- [17] Hillel D. Research in soil physics: a review[J]. Soil Sci., 1991, 151: 30–34.
- [18] 姚荣江, 杨劲松, 刘光明. 土壤盐分和含水量的空间变异性及其 CoKriging 估值: 以黄河三角洲地区典型地块为例[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 133–138.
- [19] 丁建丽, 张飞, 江红南, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤含盐量和电导率空间变异性研究: 以渭干河–库车河三角洲绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2008, 31(4): 624–632.
- [20] 赵成义, 王玉潮, 李子良, 等. 田块尺度下土壤水分和盐分的空间变异性[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 252–256.
- [21] Junior V V, Carvalho M P, Dafonte J, et al. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 85(1): 166–177.
- [22] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.