

# 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨

张殿发, 郑琦宏, 董志颖

(宁波大学 人居环境研究所, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 土壤冻融过程中的水盐运动是冻土学研究的基本问题之一。在土壤冻融过程中,存在着水分和盐分的 2 次迁移过程,形成了特殊的水盐运动规律。土壤冻结过程中盐分的运动非常复杂,受土壤类型、土壤初始含水量、土壤溶液浓度、盐分组成以及冻结生成的温度、热梯度、冻结速度、冻结方向等因素影响,其迁移结果最终是上述各因素共同作用的结果。温度是导致土壤中水分迁移的驱动力,土壤冻结引起冻结带土水势降低,导致水分不断向冻层迁移,随着水分向冻层聚集,冻层以下土层中的盐分同步向上运移,整个冻层的土壤含盐量明显增加。在融化过程中,随着地表蒸发逐渐强烈,使冻结过程中累积于冻结层中的盐分,转而向地表强烈聚集,使表层的盐分含量急剧上升。

**关键词:** 冻融作用; 土壤盐碱化; 水盐运移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2005)06-0014-05

中图分类号: S152.7

## Mechanism of Soil Salt-moisture Transfer Under Freeze-thawing Condition

ZHANG Dian-fa, ZHENG Qi-hong, DONG Zhi-ying

(Institute of Human Inhabitation Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang Province, China)

**Abstract:** One of basic problems of cryopedology is the salt-moisture transfer in soil freeze-thawing processes. The special law is made up of the two times salt-moisture transfer affected by soil type, initial moisture content, salinity and temperature. Temperature is its driving force. Salt moves towards frozen layer with moisture for soil water potential falling in the freeze process, so salinity content increases in the frozen layer continuously. In the thawing process, salinity and moisture cumulated in the frozen soil layer move up again with evaporation, salinity of the surface layer increasing sharply. The result of simulated experiment not only proves the formation process of the soil salinization, but also provides theory for prevention and cure of soil salinization in the freeze-thaw area of the North China.

**Keywords:** freeze thaw; moisture and salinity movement; soil salinization

地球上中纬度地区普遍遭受季节性冻融作用的影响,我国季节性冻土区分布面积约为  $5.14 \times 10^6$  km<sup>2</sup>。冻融引起土壤中水盐运移是导致中纬度地区土壤盐碱化多发的主要原因之一<sup>[1]</sup>。土壤中水分既是盐分的溶剂,又是盐分运移的载体,因此冻融过程中的水分运动在很大程度上决定着盐分迁移的方向和数量。

土壤冻融过程中的水盐运动是冻土学研究的基本问题之一,国际冻土学会主席佩威(Pewe)教授指出:查明冻融过程中水盐迁移规律是防治土壤盐碱化的新途径。由于受客观条件的限制,对土壤盐碱化冻融机制还不能做出系统而准确的解释。为了有效控制全球中纬度地区土壤盐碱化不断扩展的趋势,研究冻融条件下土壤中水盐运移机理具有重要的理论和应用价值。

## 1 室内模拟研究

目前,人们对非冻融土壤中水盐运移研究较广泛和深入,但对季节性冻融条件下土壤中水盐运移研究较少。20 世纪 30 年代以来,国外学者从不同角度对此问题进行讨论,80 年代以后,我国学者对季节性冻融条件下土壤中水盐运移研究才逐步重视。

### 1.1 水分运动的影响因素

国外早在 20 世纪 70 年代开始对室内冻土、融土和冻融过程的实验研究,我国 90 年代才开始这方面的研究工作,但大部分侧重单一类型水分迁移和成冰的潜在可能。通过室内模拟研究发现,土壤冻融过程中水分运动主要受温度、土壤初始含水量、盐分浓度和土壤结构影响。

1.1.1 冻融温度 冻结初期,土壤冻结深度随着地

表温度的降低而加深,且与时间呈线性关系。在地表达最大负温后,土壤冻结速度减小,冻深增加缓慢。地表温度升至1/2最大负温左右,土壤冻结深度达最大值。其后,土壤冻结下界面开始缓慢融化;当地表达正温后,土壤上下两冻结界面同时融化,且上界面融化速度明显快于下界面。土壤在冻结过程中,水分向冻结界面迁移的现象十分明显,在冻结初期水分迁移量较小,而当冻深达稳定阶段后,由于冻结界面移动缓慢,冻结界面处水分积累显著增加。在土壤冻结期间,土层中温度随深度呈线性变化,融土向冻结界面输送的热通量小于冻土层中的热通量。在土壤融化阶段,土体中间层所吸收的来自上层和下层的热通量,加快了冻土融化<sup>[1]</sup>。

1.1.2 初始含水量 土壤初始含水量对冻融条件下土壤中水分的运移具有重要作用。水分及冰是通过土壤孔隙的控制以及冰晶的生成、水的黏滞性的增强来达到对土壤入渗能力和导水率的控制<sup>[2]</sup>。在土壤初始含水量较高的条件下,土壤中会有充足的水分供给冰晶生长,在土壤中形成连续的冰晶体或冰透镜体,形成致密块状冻层,水分在其中的运移能力极低。冻结后,土壤中冰的含量与土壤初始含水量成正比。土壤中冰的含量越大,被占据的孔隙体积相对也越大,因而使得水分在土壤中的运移空间减少,移动路径增长,迁移能力减小;反之,冰的含量减小,留给水分运动的空间变大,水分在其中的移动能力也越大。初始含水量还可能影响土壤冻结深度,即对于同一土质,其初始含水量越大,土壤冻结深度越浅<sup>[3]</sup>。虽然土壤含水量的增大使土壤的导热系数增大,但是由于相变热的作用,反而使相变界面的移动速度减小,使得冻结深度变浅<sup>[4]</sup>。

1.1.3 盐分浓度 盐分对液态水压以及对未冻水含量的影响,对冻结过程中土壤水分运移具有重要作用。在土壤冻结时,盐分的存在使土壤溶液的起始冻结温度降低,不同盐分对起始冻结温度的影响不同。在相同温度下,含有盐分的土壤中未冻水含量比不含盐分或少含盐分的土壤中的未冻水含量要大,从而影响水分在土壤中不同的迁移能力。因此,在给定温度下,冻土中的未冻水含量随含盐量增大而急剧增大,且它们之间存在着很好的线性关系,这是由于冻土的冰点随含盐量的增大而直线降低之故。

1.1.4 土壤结构 冻土中的水分迁移不仅取决于冻土所处的外界条件,而且在很大程度上取决于土壤本身的物理结构,干容重的变化对水分迁移通量有重要影响。相同温度下,干容重小,土壤中有许多大孔隙,土颗粒间未冻水膜的连续性较差。增大干容重将为

未冻水提供更多的迁移机会,因为未冻水膜的连续性增大。如果干容重继续增大,土壤颗粒之间的接触越来越密,水分迁移的通道被切断,结果导致迁移通量减小。冻结条件下,质地较粗的土壤比质地较细的土壤入渗能力和水分迁移能力大<sup>[2]</sup>。

## 1.2 盐分运移

盐随水走,这是盐分在土壤中迁移的主要方式。因此,影响水分迁移的因素也会影响盐分的迁移。开放系统单向冻结的正冻土中,水分和盐分均向正冻带迁移,由于冰作为纯净相析出,因此在冰透镜体附近,会出现盐分的“高浓度带”,由此产生盐分在浓度梯度下的扩散机理。

冻结过程中易溶盐的迁移是在温度梯度、浓度梯度、水分对流共同作用下的结果。冻结过程中盐分的迁移随溶解物的不同类型而不同。随温度梯度的增大,水和离子通量都将增大;在没有盐分的冻土体系中,水流的迁移量小于含盐分土壤中水流的迁移量<sup>[5]</sup>。对于含氯化钠的冻土,与冻结过程相比,融化过程中未冻水含量随温度的变化有一定的滞后性。在某一温度范围内,融化过程未冻水含量的滞后值很大,且随总含水量和初始土壤中溶液浓度的增大而增大,并随土类的不同而不同。

在正冻土中,冰相从 $-2^{\circ}\text{C}$ ~ $-4^{\circ}\text{C}$ 之间产生,在融化过程中,孔隙中冰相可以在 $1^{\circ}\text{C}$ ~ $3^{\circ}\text{C}$ 时仍然存在。冻土和冰体中离子有相当高的迁移力,离子的渗透倾向依土壤温度、结构和成分而定<sup>[6]</sup>。当存在浓度差时,浓度扩散将占主要地位,而且,离子的扩散作用可以在未冻水层、孔隙冰体的结晶边界上进行,甚至可以从冰体中穿过;浓度扩散作用发生的最佳条件是存在未冻薄膜水,并在最大负温条件下薄膜水达到最大厚度。

在相同温度下,随土壤颗粒变小,含盐量增大,相变锋面温度的最低点会变小,并从不含盐和含盐饱和土壤中获得相变锋面温度。在冻结过程,富含水的沙土形成冰晶低温结构,易溶盐离子的重新分布由冻结样品中已冻和未冻部分的边界所决定,离子含量局部最高值可指示永久性冻结沉积物的冻结方向<sup>[6]</sup>。

由上述可知,土壤冻结过程中盐分的运动非常复杂,受土壤类型、土壤初始含水量、土壤盐分组成以及冻结生成的温度、热梯度、冻结速度等因素影响,其水盐迁移过程是上述各因素综合作用的结果。

## 2 田间试验研究

在土壤冻融的整个发展过程中,经历了初冬冻融循环,冬季冻结,初春冻融循环3个阶段。冻土中水

分迁移主要是由于地表与大气间的热量和水分交换,导致地温随时间和空间变化,土层周期性的冻结和融化,土中部分水的相变造成未冻土与已冻土间以及已冻土内的湿度梯度和相应的土水势梯度,导致土壤盐分随水分由下向上迁移。此时,如果土壤冻结速度不是很快,水分就会有较为充分的时间迁移到冻结带并冻结。在冻结过程中可能由于冰的结晶纯化作用,使随水分迁移到冻结带中的盐分在水冻结成冰的过程中析出。当气温的继续下降而导致冻结带不断向土壤深处延伸,原来的未冻带逐渐变为冻结带,于是不断重复土水势降低,相邻未冻带水分向冻结带的迁移补给,补给水分的冻结以及可能存在的盐分的析出。在特定条件下会形成冻结土壤与非冻结土壤互层现象,或者由于温度的回升,地表处于消融状态而地下仍然处于冻结状态。

在冬春季土壤所经历的冻结和解冻过程中,土壤的入渗特性发生很大的变化<sup>[7]</sup>。在土壤冻结过程中,土壤的累积入渗量、入渗率随冻结深度的增加而减小,稳定入渗率减小幅度很大。在解冻过程中,土壤的累积入渗量和入渗率又随解冻过程的进行而增加。冻结过程中液态水的相变(变为固相)和解冻过程固态水的液化是导致土壤水分入渗特性变化的原因所在。

季节性冻融条件下,地下水埋深对土壤水分运移也有较大影响。在冻结期,潜水埋深较浅的情况下,土壤下层的未冻水在土水势作用下向冻土层迁移,并凝聚在冻土层中,引起潜水向上部土层补给,造成潜水在土壤冻结过程中产生“潜水蒸发”现象。由于潜水向上的补给,使得在土壤冻结过程中,冻层的总含水量不断加大。冻结过程中潜水位最大降深与初始潜水埋深间的关系可用反 Logistic 公式表示<sup>[8]</sup>。

盐渍化土壤冻结期缩短,冻结深度减小,冻结起始位置不是地表,而是位于地表以下某个深度,导致在冻结期间有 2 个冻结锋面出现,使水热盐动态更为复杂<sup>[9]</sup>。干寒气候区的季节冻土,土壤地下水位以上非饱和带毛细作用发育,在地表蒸发作用下,通过毛细作用,地下水不断地向地表运动,导致大量盐分到达地表。虽然蒸发作用下的毛细水运动在土壤水分垂直运动中占绝对优势,但自上而下的季节冻结和融化过程对土壤中水盐重分布的影响也起着重要的作用<sup>[10]</sup>。同时由于“冻层滞水”在春季的融化,有淋洗表层土壤盐分的作用,使土壤表层脱盐<sup>[13]</sup>。

在实际生产中,田间不同处理条件使土壤温度变化不同,从而冻结深度、冻结速度以及水分的迁移变化结果等多方面产生不同现象,冬季冻结条件下土壤

表层的蒸发作用以及地表降水现象对水分和盐分的迁移与分布有很大影响。蒸发作用使地表水分上下起伏变化剧烈,表层土壤总盐量呈现增大趋势。土壤水泥硬壳覆盖后土壤的冻结时间减少,冻结深度变浅;由于减少土壤水分的无效蒸发,明显抑制土壤在融冻时期的土壤返盐<sup>[11]</sup>。采用地膜覆盖方式减少水分蒸发,使水分与盐分向上迁移能力减弱,对防治土壤盐碱化具有很好的效果。

### 3 冻融过程中土壤水盐迁移机理探讨

冻融过程中土壤水盐迁移机理研究包括迁移驱动力和迁移过程。中纬度地区土壤的冻结与融化以及在二者之间出现的冻融循环,归根结底是由于温度变化引起的。因此,温度降低的速度,低温持续的时间,都会对土壤中水分与盐分的迁移产生极为显著的影响。造成土壤中水分迁移的微观机理包括氢键吸附能、饱和水汽压差和毛管薄膜机制<sup>[13]</sup>。水分是盐分的溶剂,又是盐分的载体,除盐分因各种物理或物理化学的原因而产生的变化外,水分迁移机理很大程度上控制了盐分的迁移机理<sup>[12]</sup>。

#### 3.1 迁移驱动力

土壤中任何一个给定位置上的水分都受到许多力的作用,包括处于潜水位以上水的重量、在非饱和土中水与固体颗粒的相互作用、土壤中盐分的存在以及高程等等。因为这些力有不同的作用方向,很难找出它们对水分迁移的综合效应。30 年代以来,国外把能量观点逐步引入这个领域,用以解释土壤的持水性,并进行土壤水分动态研究。60 年代初期,国际土壤学会提出了土壤水分势能的划分及其定义。土壤水的总势为由压力、重力、温度、基质、盐分、和电力等构成的各分势之和,其中任何一种分势梯度都可以引起水分迁移。在引进土壤水的势能概念以后,就从数量上和方向两方面明确了水分迁移动力机制。

土水势梯度是冻土中水分迁移的驱动力,由于冻土中部分液态水相变成冰,增大了冻土与未冻土间土水势差值。未冻水迁移是冻土水分迁移中的主要方式,温度是导致土中水相变,制约冻土中未冻水含量以及相应制约土水势的一个主导因素。因此,温度、未冻水含量和土水势构成冻土中水分迁移的 3 大基本要素<sup>[14]</sup>。

从分子水平来讲,当水相变为冰时,土壤中形成高度有序的笼状结构,从而限制了水分子的自由活动,使水分子活动的动能降低。由于水分子的活动受到限制,当附近水分子或水蒸气分子与冰晶碰撞时,便会与笼状网格上水分子形成氢键而被捕获。被捕

获水分子的数量大大超过挣脱分子间氢键的水分子, 导致冰体周围及附近水分子克服种种阻力: 如浓度势、基质势等, 以液相或气相向冰体的迁移, 直至建立起新的平衡。宏观上则表现出冰体周围液态水和气态水的减少, 形成较低的土水势和水气压力。在冰晶表面, 氢键的吸附能较强, 因而在冰体表面占主导地位; 在冰体周围, 由于水气被冰晶所俘获而导致水气压降低, 液态水周围气压相对较高, 为建立二者之间新的平衡而产生一个向冰体运动的力, 形成蒸气状态水的位移, 导致土壤中毛管水曲率以及液体压力的增大。上述现象表现为水分受到诸如毛管力等力的驱动, 水分不断克服周围的种种阻力向冻结带迁移, 直至建立起土壤中新的动态平衡为止。

### 3.2 迁移过程

水分的运动最终决定了盐分的迁移, 水分在温度梯度下的运动决定了盐分总的运动与变化趋势。随着温度降低, 导致土壤温度的下降和水的相变。冻结带土水势降低, 土壤吸力增大, 相邻非冻结带土水势相对增大。水分由土水势高处向土水势低处运动, 盐分也随之向上迁移。

在土壤冻结过程中, 水分对流导致盐分的重新分布。当水被吸向冻结带时, 盐分也随着向冻结带迁移, 盐分重新分布的程度取决于盐分梯度和热梯度。盐分在土壤中的重新分布、冰的生成、盐分的析出, 导致盐分在冰冻前锋下的积累。冻结锋面聚集的盐分, 以及冻结锋面下未冻水中的盐分会形成浓度梯度引起盐分的扩散, 该浓度梯度还导致在冻结锋面温暖一侧土壤水中形成冰点梯度。当冰点降低时, 由于扩散作用引起的盐分流在冻结锋面下一定距离内产生影响。因冰点下降的速度比温度下降速度慢, 冻结锋面会跳过这些富含盐分的条带, 将它们包含在冻结的基质中, 形成冻结与非冻结的互层现象, 这种现象出现的程度随最初盐分浓度和冻结速度而异。

由于冻土中有未冻水存在并把冰和土颗粒分割开来, 土颗粒外围的未冻水层呈不对称分布(暖面厚, 冷面薄), 形成了不平衡的渗透压力, 于是所产生的液流提供了冰透晶体生长所需求的水分。蒸汽运输不是冻土中水分迁移的主要方式, 非饱和冻土中, 只有在相互联系的孔隙中被冰堵塞时, 蒸汽运输才起作用。土壤冻结期间, 蒸发量随土壤负积温的增大而增大, 随潜水埋深的增加呈指数减小, 土壤冻结期潜水蒸发量与负积温的平方根成正比<sup>[15]</sup>。

非饱和土壤中的水盐变化不仅受吸着力、吸附力、毛管力的影响, 还受到盐分的影响, 即存在盐分势, 总的结果是由于温度的降低破坏了土壤中原有的

土水势平衡所致。对黏性土来说, 一般把塑限含水量作为区分毛细水和薄膜水的界限含水量。当土中含水量大于塑限含水量时, 土中的水分以毛细机制为主; 当土中含水量小于塑限含水量时, 其中的水分迁移逐渐转向以薄膜机制为主。如果土中含水量继续减少, 则土中的水分迁移将从以液态水迁移为主的形式向以气态水为主迁移形式过渡<sup>[2]</sup>。

从宏观上来讲, 温度下降越快, 土壤冻结锋面的延伸速度就越快, 土壤的冻结速度也就越快, 土壤水盐没有充足的时间进行重新分布; 反之, 当温度下降较慢时, 土壤中的水盐有足够的时间进行迁移, 水盐就会产生显著的再分配现象。

## 4 存在问题及研究展望

冻融条件下盐分随水分迁移的内在机制研究, 目前国内外都处于探索阶段, 尤其在田间条件下, 处于开放的自然体系中, 影响和控制因素众多, 对于水分迁移过程中因为盐分的影响而产生的影响, 目前只有盐分对冰点的影响得到重视, 盐分存在而产生的盐分势大多数情况下被忽略。因此, 自然条件下盐分的迁移以及对水分迁移的影响是未来研究方向之一。在冬季冻结条件下, 土壤表层水分的蒸发作用也不容忽视。目前, 土体构造对土壤冻融条件下水分的迁移研究较少。

目前, 盐分对冻结的起始温度的影响已经引起了人们的注意, 因为土壤溶液中盐分的存在, 而使其变得不确定。冻土的研究中, 往往取地表作为剖析有关课题的上界面, 把地表面的有关参数及其变化作为上边界条件。但是, 由于地表的一系列参数难于获取, 人们往往用与近地面层气温有关的参数来代替。目前, 确定土壤是否冻结仅仅依靠地面气温来确定, 但地气体系有关参数的替换决不是一种简单的等值替换。因此, 关于研究土壤的冻结温度对于模型的应用和发展也是很重要的。

基于理论分析, 国内外学者试图构建求解土壤冻融过程中水—热—盐耦合运移的数学模型<sup>[17-20]</sup>, 由于问题的复杂性和测试手段、研究水平的限制, 模型中还存在许多问题尚待解决。诸如: 冻土未冻水中溶盐离子成分及其分布目前还无法测定; 土壤水中溶盐的存在而产生的盐分势和由温度场的温差引起的温度势, 在土壤水分析中的定量应用还有困难, 土壤溶液内部化学过程的方向和速度同样难以确定, 土壤水—热—盐运移方程中的参数, 冻融过程中土的相系变化和土壤溶液理化性质变化尚需深入研究。在研究冻融土壤水分迁移的过程中, 水分迁移系数的确定对

模型的应用以及准确预报至关重要。但令人遗憾的是,涉及到的冻融条件下水分运移系数很大程度上依赖于未冻条件下土壤水分的运移系数。而且,很多模型假设冻土与未冻土具有相同的导水率。非饱和土壤在未冻条件下水分迁移系数的确定要比饱和土壤条件下的确定复杂的多,而冻结条件下水分在迁移过程中会发生水或冰的相变或二者都存在的情况,因此,如何确定冻融条件下的水盐迁移系数是目前很重要的研究课题之一。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Dianfa Zhang, Wang Shijie. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in northeast China [J]. *Environmental Geology*, 2001, 41(1-2): 96-100.
- [ 2 ] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 科学出版社, 1991.
- [ 3 ] Williams P J. Moisture migration in frozen soil[M]. *Permafrost: 4th Int'l. Conf., Final Proceedings*, 1984, National Academy Press, Washington, D. C., U. S. A. 64-66.
- [ 4 ] 郭占荣, 荆恩春, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 298-302.
- [ 5 ] Celia M A, Bouloutas E F. A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation[J]. *Water Resources*, 1990, 26(7): 1483-1496.
- [ 6 ] 张立新, 徐祖, 邓友生. 含氯化钠土未冻水含量与冻融过程关系的特征[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(3): 258-262.
- [ 7 ] 樊贵盛, 郑秀清, 赵生义. 大田土壤冻融条件下入渗特性的试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(3): 31-37.

(上接第 4 页)

(2) 不同利用条件对梯田土壤水分状况影响较大,玉米、谷子全生育期的农田蒸散量分别为 502.9 mm 和 473.9 mm,而同期对照休闲地的蒸散量仅为 414.1 mm。

(3) 玉米全生育期  $ET/E_0$  (农田蒸散量/同期水面蒸发量) 的比值为 0.77,并且在拔节一抽雄期和抽雄一灌浆期该值都大于 1,而谷子全生育期的  $ET/E_0$  值为 0.69。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 5-9.
- [ 2 ] 刘文兆, 胡梦瑾, 侯喜禄, 等. 半干旱黄土丘陵区小流域横断面土壤水分生态特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 95-100.
- [ 3 ] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北

- [ 8 ] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀, 等. 冻融期地下水位变化情况下土壤水分运动的初步研究[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(2): 64-68.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 张立新, 韩文玉, 顾同欣. 冻融过程对景电灌区草窝滩盆地土壤水盐动态的影响[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(3): 297-302.
- [ 11 ] 李伟强, 雷玉平, 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.
- [ 12 ] 孙向武. 冻融条件下非饱和带土壤水盐运移的试验研究[C]. 太原理工大学硕士学位论文, 2000.
- [ 13 ] 那平山, 徐树林. 冻结滞水形成机制的探讨[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(3): 273-277.
- [ 14 ] 方汝林. 土壤冻结、消融期水盐动态初步研究[J]. *土壤学报*, 1982, 19(2): 100-106.
- [ 15 ] 雷志栋, 尚松浩, 杨诗秀, 等. 地下水浅埋条件下越冬期土壤水热迁移的数值模拟[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 51-54.
- [ 16 ] 岳汉森. 土壤在冻融过程中水-热-盐耦合运移数学模型之初探[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(4): 308-313.
- [ 17 ] Newman G P, Wilson G W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during soil freezing [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(1): 63-70.
- [ 18 ] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. *Water Research*, 1973(9): 1314-1323.
- [ 19 ] 胡和平, 杨诗秀, 雷志栋. 土壤冻结时水热迁移规律的数值模拟[J]. *水利学报*, 1992(7): 1-8.
- [ 20 ] 石春林, 虞静明, 金之庆. 饱和土壤冻融过程中水热迁移数值模拟[J]. *中国农业气象*, 1998, 19(4): 21-26.

京: 科学出版社, 1998. 42-68.

- [ 4 ] 魏宇昆, 王俊峰, 等. 黄土丘陵区不同立地条件沙棘水分特征与生物量研究[J]. *沙棘*, 2001, 14(4): 5-8.
- [ 5 ] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 84-91.
- [ 6 ] 朱德兰, 吴发启. 不同地形部位土壤水分的年变化分析[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(4): 28-31.
- [ 7 ] 刘梅, 蒋定生. 不同坡面位置土壤水分差异规律分析[J]. *水土保持通报*, 1990, 10(2): 16-20.
- [ 8 ] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [ 9 ] 陈云明, 侯喜禄, 刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水保生态效益研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(3): 57-61.
- [ 10 ] 赵姚阳, 刘文兆, 胡梦瑾. 旱作条件下川地与梯田谷子水量平衡过程的比较[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 109-112.