

秋灌对冻融期土壤水盐热时空变化规律影响 及灌水效果评价

倪东宁, 李瑞平, 史海滨, 苗庆丰, 梁建财

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究河套灌区秋灌条件下冻融期土壤水盐热变化规律及其灌水效果, 采用田间试验的方法, 对秋灌前至土壤冻融结束期间温度变化下水盐运移规律及玉米播种前的土壤水盐热条件进行了研究分析。结果表明: 冻融期各层土壤温度在各时段具有相同的变化趋势, 土壤温度的变化直接影响到水盐的运移过程; 冻结期在温度梯度作用下非冻结区水分向冻结区运移使得冻结区土壤含水率增加, 平均增幅 4.02% ~ 18.18%; 进入消融期后上层土壤出现返浆现象, 0 ~ 10 cm 土壤含水率平均较冻结期增加 11.54% ~ 111.15%; 随着温度的升高, 在水势梯度的作用下盐随水向表层运移出现春季返盐现象; 秋灌后土壤盐分被淋洗到作物根系层以下, 但还存在于田间, 所以冻结期随着水分的上移, 根系层以下盐分又被带到上层土壤中, 各土层含盐量平均增幅 11.19% ~ 50.19%; 消融结束后下层土壤由于消融水下渗, 盐分随之向下运移, 20 ~ 100 cm 土层含盐量平均降幅 15.71% ~ 44.95%, 呈现脱盐趋势。研究表明秋灌灌水定额为 $1\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 播前土壤水、盐、热状况较适宜于灌区玉米覆膜沟灌种植模式。

关键词: 秋灌; 冻融期; 土壤温度; 水盐运移; 玉米; 河套灌区

中图分类号: S278; S513; S274.1 **文献标志码:** A

Temporal and spatial variation of soil water – salt – heat during freezing and thawing period and the irrigation effect under the autumn irrigation

NI Dong-ning, LI Rui-ping, SHI Hai-bin, MIAO Qing-feng, LIANG Jian-cai

(Water conservancy and civil engineering college, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: In order to study the changes in soil water – salt – heat during freezing and thawing period and evaluate the effect of autumn irrigation in Hetao Irrigation District. The water-salt transportation under the changing temperature and soil water – salt – heat condition before maize seeding were analyzed based on field experiment. The results show that temperature of the soil layer during freezing and thawing period changed similarly for each period, affecting the moving of water and salt. In the freezing period, the non-frozen area water moved to the frozen area according to the temperature gradient, as increased by 4.02% to 18.18% by soil moisture. In the melting period, the 0 ~ 10 cm layer soil moisture content increased 11.54% ~ 111.15% higher than freezing period. With the increase of temperature in spring season, the salt first moved with water to the surface soil under the water potential gradient. In the freezing period, the salt below the root layer is taken to the upper layer of soil, and the average increase rate in salt content is 11.19% ~ 50.19%. Because of the infiltration of melt water and downward transport of the salt, the subsoil showed a tendency to desalination after soil melting, the salt content decreased on average by 15.71% ~ 44.95% in the 20 ~ 100 cm layer. Autumn irrigation quota of $1\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, is suitable for planting pattern of maize mulching and furrow irrigation. The results of this study could be used to formulate autumn irrigation scheduling in Hetao irrigation district.

Keywords: autumn irrigation; freezing and thawing period; soil temperature; water and salt transport; maize; Hetao irrigation district

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369018); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2011BS0301); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B03)

作者简介: 倪东宁(1990—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: ndn901021@163.com。

通信作者: 李瑞平(1973—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术应用研究。E-mail: nmglrp@163.com。

在干旱半干旱的寒冷地区,季节性冻融期土壤水盐运移是造成土壤盐分再分配、土壤盐渍化的主要原因之一^[1]。土壤冻融过程中伴随着一系列复杂的物理、化学、力学及其子过程的现象,其主要包括土壤水分和热量的传输、水分的相变及盐分的积累过程^[2]。据统计在全球陆地面积的 70% 冻土中,56% 为季节性冻土;而河套灌区所处地为典型的季节性冻融区,秋灌是该地区从多年的生产实践活动中获得的传统技术,主要起到淋洗耕作层土壤盐分和为来年春播蓄水的保墒作用^[3-4]。但是经过研究者们的大量试验研究发现在土体的整个冻融过程中,由于温度梯度、水势梯度和强烈的蒸发作用,导致盐分随水分向表层土壤迁移,造成严重的春季返盐现象,威胁到了出苗率和作物的生长。国内学者对冻土的冻融过程也做了大量的试验研究,黄兴发等^[5]对裸地与地膜覆盖下冻融期内土壤温度、水分和盐分的变化作了深入研究;李瑞平等^[6-7]利用 SHAW 模型分析研究了季节性冻融期内土壤的冻结、融化过程以及冻融期间水热迁移规律;张殿发等^[8-9]研究发现冻融过程中盐分的运移过程是受到土壤类型、初始含水率、溶液浓度、盐分组成以及冻结生成的温度梯度、冻结方向等多种因素共同的影响;彭振阳等^[10]对秋浇后冻融期内的水盐运移规律研究后得出经历冻融后,土壤整体储盐量不减反增的结论。同时国内外学者也对土壤冻融过程的水盐热迁移规律的影响因素及耦合效应等进行了大量的数值模拟研究,并建立了不同条件下的模拟模型^[11-14]。可见,对于季节性冻融期土壤水盐热的运移规律已经有了大量的研究成果,但针对河套灌区秋灌灌水后这一特定环境下的冻融期土壤水盐热运移规律系统性的研究甚少,同时针对冻融循环后的土壤水盐热条件对翌年春玉米的播种及出苗的影响少见报道。

本文在前人的研究基础上,基于盐渍化灌区秋灌条件下土壤冻融期的水盐热变化规律进行监测,研究秋灌前至土壤冻融结束的整个过程中土壤温度变化对土壤水盐运移的影响,同时分析了玉米播种期的土壤水盐热条件对玉米出苗及幼苗生长的影响,为河套灌区秋灌灌水定额及灌溉时期的确定以及土壤盐碱化的防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古河套灌区磴口县补隆淖尔镇坝楞村,该地区多年平均无霜期为 130 d 左右,土壤

冻融期 160 d 左右,冻土层厚度在 1.1~1.3 m 左右;年平均气温 7.6℃,最高气温为 37.4℃,最低气温为 -33.1℃,温差变化较大;年均降雨量 142.1 mm,蒸发量 2 359.5 mm;年平均风速 2.75 m·s⁻¹,属典型的温带大陆性季风气候;耕作层土壤盐分主要成分为氯化物-硫酸盐,土壤容重平均为 1.48 g·cm⁻³,地下水位在 3.0 m 以下^[15]。试验区土壤质地为砂质黏壤土、黏壤土和粉质黏壤土,0~20 cm 为砂质黏壤土,土层平均容重为 1.52 g·cm⁻³,20~80 cm 为黏壤土,土层平均容重为 1.47 g·cm⁻³,80~100 cm 为粉质黏壤土,土层平均容重为 1.44 g·cm⁻³。

1.2 试验测定内容及方法

试验时间为 2012 年秋灌前至翌年春玉米出苗后为止,整个试验过程共取样 6 次进行测试分析,取样时间为秋灌前、封冻前、冻结期、最大冻深期、消融期和融通期。

试验区秋灌时间为 2012 年 10 月 25 日,灌水定额为 1 500 m³·hm⁻²。土壤温度采用 HZR8T 四路土壤温度记录仪自动监测;土壤含水率测定利用 HS-300 型动力取土器,分别在 0~5,5~10,10~20,20~40,40~60,60~80,80~100 cm 土层取土样,用称重烘干法测定;土壤电导率的测定方法为:将烘干土样粉碎过筛,取 5 g 土和 25 g 蒸馏水按 1:5 的土水比混合搅拌、离心,将离心后的提取液用电导率仪速测 EC 值,取样深度同含水率的测定,本文以土壤溶液电导率表征土壤含盐量。为减小试验的随机误差,试验田块内定 5 个取样点。翌年玉米采用垄作沟灌的种植模式,采用内蒙古农业大学自行改进的一体式开沟机,开沟施肥覆膜一次性完成,开沟起垄后,垄上点种玉米,沟断面为梯形,沟深 30 cm、沟底宽 40 cm、沟顶宽 60 cm,玉米垄宽 40 cm;玉米出苗后进行出苗率统计,出苗率 = 出苗数/播种粒数。

2 结果与分析

2.1 冻融期土壤温度的时空变化特征分析

2012 年 12 月初至 2013 年 3 月下旬为土壤冻融期,当年 12 月初土壤开始冻结,至次年 1 月中下旬达到最大冻深(约 65 cm),3 月下旬开始进入消融期,土壤双向融化,至 4 月中旬完全融通。

图 1 为秋灌前至冻融结束土壤温度变化曲线:由图 1 可知不同深度土层温度在各时段具有相同的变化过程,然而最低温度值的出现时间随着土层深度的增加表现出滞后效应;而且冻融期开始后地表温度变化幅度最大,原因是随着土层深度的增加,外界环境因素对其影响逐渐减弱,故而地温的变化幅

度逐渐减小,而当土层冻深达到最大,其变化幅度又趋于稳定;地温的变化直接影响到土壤水分的迁移过程,进而影响到土壤盐分的运移。

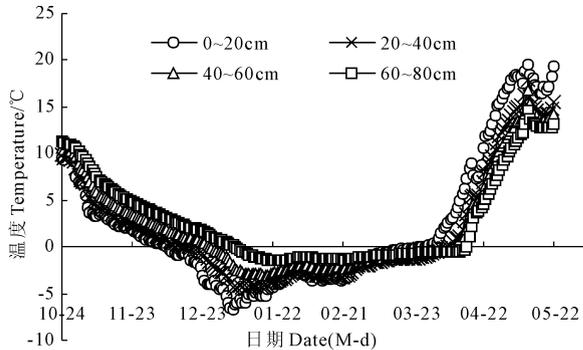


图1 各土层土壤温度变化

Fig.1 Change of soil temperature of each soil layer

2.2 土壤含水率的时空变化分析

土壤冻融过程中热量的传输对土壤水分的运移过程有着重要的影响,两者表现为相互影响、相互作用的关系。由图2秋灌前至冻融结束整个时段内(期间无降水)各土层土壤含水率变化可知,秋灌前土壤剖面含水率自上而下呈现出递增趋势;秋灌后各土层含水率有明显的增加,自秋灌结束至土壤开始冻结前表层土壤在蒸发和下渗作用下,土壤含水率与秋灌前相比变化的幅度不是很大,而且土壤水分主要聚集在60~100cm。进入冻结期以后0~5cm的表层土壤由于蒸发的作用含水率急剧下降,5~60cm的土壤含水率有不同程度增加,平均增幅4.02%~18.18%,而60~100cm的土壤含水率不同程度有所减少,平均降幅9.09%~10.71%,原因是土壤温度由上到下逐渐降到0℃以下,由于上层土壤冻结,在温度势梯度的作用下,下层的非冻结区的水分开始向上层的冻结区移动,结果使得冻结区含水率增加;而在土壤冻层深度达到最大以后土壤含水率趋于稳定。消融期后,由于土壤返浆,0~10cm土壤含水率显著增加,平均较冻结期增加11.54%~111.15%,这是由于在土体没有完全融化之前,上层中冻结的冰屑融化后消融水不能下渗,从而形成返浆水;下层冻层中消融水分下渗,导致下层土壤含水率有小幅度的增加;而随着时间的推移,温度不断升高,在强烈的蒸发作用下,各层土壤含水率都有不同程度的减小,以0~20cm土层的土壤减小幅度尤为强烈,平均降幅48.28%~52.63%。由于蒸发作用,土壤水势降低,下层土壤水分向上层运移;同时由于融化,下层土壤中水分向更深层土体下渗补给,导致下层土壤含水率有不同程度的降低;而在土体

冻层双向消融的过程中处于土体中间的未解冻土层在一定程度上起到了隔水作用,所以上层消融层水分主要消耗于蒸发,下部消融层水分则主要消耗于下渗补给。而从整体来看整个土壤冻融期5~100cm土层含水率自上而下呈现出大-小-大的变化规律。

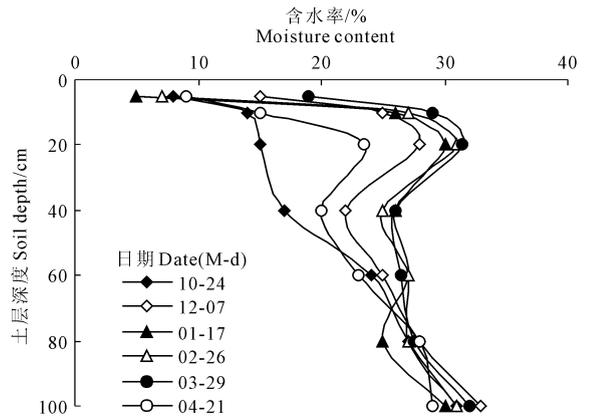


图2 各土层土壤含水率变化

Fig.2 Change of moisture content of each soil layer

2.3 土壤含盐量的时空变化分析

由图3秋灌前至土壤冻融期结束各层土壤含盐量变化曲线可知,秋灌后,各层土壤含盐量随水分的下渗明显减少,由表层至深层平均降幅15.89%~44.07%,可见秋灌达到了压盐的目的。冻结期开始后,在温度梯度的作用下,随着水分的上移,下层土壤盐分也随之上移,使得上层土壤的含盐量明显增加,各土层出现第一次返盐。由于秋灌只是将盐分淋洗到了作物根系层以下,所以田间土壤中的盐分并没有被排走;在冻结期,随着水分的上移,根系层以下的土壤盐分又向上运移到作物根系层,使得上层土壤含盐量显著增加,平均增幅11.19%~50.19%。1月中下旬土壤达到最大冻深,此时冻结趋于稳定,而此时由于在盐分浓度梯度的作用下60~100cm土层的含盐量向下层未冻结土层运移,使得土壤含盐量有小幅度的减小,但总的来说在土壤冻结期土壤含盐量保持在较稳定的状态。三月下旬土体进入消融期,土壤开始双向融化;随着气温的不断升高,蒸发作用增强,表层土壤的水势不断降低,在水势梯度作用下水分不断上移,盐水相随致使表层0~20cm土层盐分积聚,而下层土体由于消融,随着消融水的回渗土壤含盐量有明显减少,平均降幅15.71%~44.95%,呈现脱盐趋势。

而从整体来看,从土壤冻结期开始至土壤冻结至最大冻深期间,在冻深达到最大值时,各层土壤含盐量都较土壤冻结初期显著增加,各层土壤积盐率

在 12.6% ~ 100.7% 之间。消融期开始至土体完全融通的过程, 20 ~ 100 cm 各土层土壤含盐量明显减少, 脱盐率在 16% ~ 45% 之间; 而表层土壤 0 ~ 20 cm 的土壤含盐量却呈现严重的积盐状态, 积盐率在 13% ~ 29%, 造成土壤的第二次返盐即春季的土壤返盐现象, 这也是冻结层土壤含盐量再分布的结果。

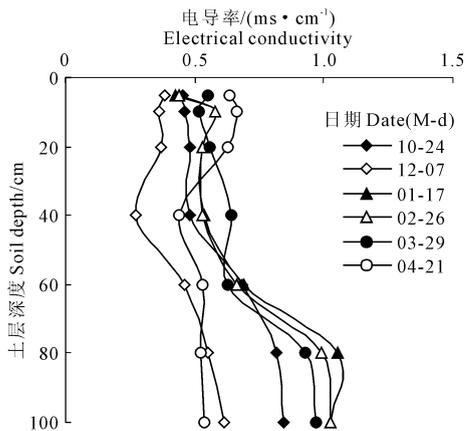


图 3 各土层土壤含盐量变化

Fig. 3 Change of salt content of each soil layer

2.4 秋灌灌水效果评价

河套灌区特有的气候和土壤条件决定了其农业生产过程的特殊性, 秋灌是河套灌区多年的生产实践形成的一种秋季储水灌溉方式, 其主要目的是为翌年春季小麦、玉米的播种和苗生长储墒以及淋洗作物耕层盐分, 而在北方寒冷干旱地区, 春寒是影响春耕、出苗和作物幼苗生长的限制性条件, 同样影响着农业的正常生产活动。在土体经历冻融的过程中, 土壤水盐热三者的变化迁移规律具有一定的耦合效应, 因此研究土壤融通期土壤的水盐热状况对于保证农业生产和指导秋灌水量具有重要意义。

试验区翌年春季种植玉米进行小区试验, 所以本文只考虑玉米播种前期的土壤水盐热条件变化; 杨松等^[16]研究表明, 玉米适宜播种期为表层地温稳定通过 10℃ 初日前 3 ~ 5 d, 按照此标准, 翌年 4 月 23 日播种玉米。

2.4.1 秋灌对玉米播种期土壤温度的影响 玉米作为典型的喜温性作物, 对低温冷害的抗性较差, 种子着床后适宜的土壤温度条件是保证种子萌发的必要条件, 过高或过低都易使种子腐烂、霉变。而针对玉米低温胁迫机理与应用等方面已有大量的研究成果, 陈民生等^[17]研究得出, 玉米种子的发芽率、发芽势及发芽指数随温度的降低而降低; 徐田军等^[18]研究得出, 玉米苗期光合特性及过氧化物酶活性等都随低温的胁迫作用而加剧; 由图 1 可知, 本研究中玉

米播种至出苗期土层 0 ~ 20 cm 平均地温 12.75℃, 较适宜于种子萌发, 且整个苗期土层平均温度都保持在 18℃ 上下, 有利于玉米苗期的正常生长。

2.4.2 秋灌对玉米播种期土壤含水率的影响 北方干旱半干旱地区, 春播玉米种子极易遭受土壤水分胁迫作用, 影响种子的正常萌发; 但是如果水分过剩, 会造成农田塌湿, 延误最佳农时, 因此适宜的土壤水分是保证农业正常运转的必要条件。而针对土壤水分对玉米种子发芽及苗期生长的影响, 很多学者已进行了大量研究, 孟宪欣等^[19]研究表明, 当土壤含水量在 15% ~ 20% 范围内, 较适宜于种子的萌发和培育壮苗; 侯玉虹等^[20]提出了不同土质下保证玉米出苗和苗期生长的最佳底墒范围, 壤土为 19% ~ 22%, 粘土为 26% ~ 29%, 沙土为 13% ~ 15%。而本试验中 20 ~ 80 cm 土层土质条件为砂质黏壤土; 结合表 1 (各土层含水率加权平均算得) 综合分析, 玉米播种期配合覆膜保墒的措施, 基本上满足种子正常萌发所需水分条件, 据统计翌年玉米一次出苗率为 90.52%。但是观察发现, 秋灌条件下经过整个冻融过程后, 0 ~ 20 cm, 0 ~ 40 cm 土壤含水率增加极显著 (t 检验, $P < 0.01$), 平均增幅为 40.12% 和 26.24%, 而其它土层增加不显著, 增幅分别为 11.74%、9.40%、6.82%、1.60%; 考虑到苗期无灌水, 如果裸地种植, 土壤底墒不能够保证玉米苗期生长所需的水分条件。因此综合考虑应适当增加秋灌水量或延迟灌水时间, 在考虑节水的同时保证玉米正常生长所需的土壤水分条件。

表 1 各土层土壤含水率

Table 1 Moisture content of each soil layer

土层深度/cm Soil depth	秋灌前/% Before autumn irrigation	播种前/% Before seeding
0 ~ 10	12.10	13.52
0 ~ 20	13.71	19.21
0 ~ 40	15.47	19.53
0 ~ 60	19.26	21.07
0 ~ 80	22.14	23.65
0 ~ 100	24.95	25.35

2.4.3 秋灌对玉米播种期土壤含盐量的影响 玉米播种至幼苗期, 受盐害主要表现为种子播种后不能正常萌发、幼苗期受盐害死苗, 给玉米的出苗、保苗带来困难。由图 2 可知, 土体经历冻融过程后, 在土壤温度梯度和水势梯度作用下, 土壤含盐量进行了重新分布, 玉米播种前表层 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层含盐量变化极显著 (t 检验, $P = 0.001 < 0.01$), 土壤呈现严重的积盐状态, 较秋灌前分别增

加39.51%、44.78%、31.52%,而下层20~80 cm呈现脱盐趋势,差异极显著(t 检验, $P = 0.001 < 0.01$)。经历冻融循环后,下层20~30 cm处土壤含盐量较低,开沟起垄后下层土壤被耕翻到耕作层,为玉米种子的萌发提供了相对淡化的着床环境,加之覆膜后,改变了土壤的水热循环系统,更好地抑制了盐分的运移,使耕层保持相对较低的盐分水平,有利于玉米种子的萌发和幼苗的生长。

3 结论与讨论

通过大田试验对冻融期土壤温度、水分以及含盐量的变化进行了机理性的探讨和分析,得出以下结论:

1) 冻融期各时段不同深度土层温度变化过程具有一致性;冻融期刚开始地表温度变化幅度最大,随着土层深度的增加变化幅度逐渐减小;地温的变化直接影响到土壤冻融过程水盐的运移。这与郑秀清等^[21]的研究成果基本一致。

2) 整个冻融期5~100 cm土层含水率自上而下基本上呈现出大-小-大的变化规律;冻结期下层非冻结区的水分向上层的冻结区移动使得冻结区含水率增加^[22];进入消融期0~10 cm出现土壤返浆现象;由于强烈的蒸发作用,盐随水走,造成表层土壤盐分积聚,出现春季返盐现象。

3) 秋灌后至土壤冻结初期,由于温度梯度和水势梯度的作用,盐分随着水分的运移向表层土壤积聚,出现第一次返盐;消融期后土壤双向融化,下层表现出脱盐趋势,表层0~20 cm土层呈现积盐状态,出现第二次返盐。

4) 秋灌只是将盐分淋洗到了作物根系层以下,进入冻结期以后,根系层以下的土壤盐分又随水分运移到作物根系层使得土壤含盐量显著增加。

5) 本研究表明,1 500 m³·hm⁻²的秋灌灌水定额可以保证该地区玉米覆膜沟灌条件下的春播和幼苗的生长所需的土壤条件,最大程度上达到了节水的效果;但针对裸地种植的条件,还需要增加秋灌灌水定额或延迟灌水时间,以保证玉米的出苗和幼苗生长所需的水盐热条件。

6) 本文关于秋灌灌水对土壤经历冻融过程中盐分运移的受抑制程度还没有详细的阐明,有待于深入研究;同时,由于研究区地下水位较高,在今后的研究中还应该考虑地下水位变化对冻融期土壤水盐运移的影响,以便更好地确定秋灌水量,指导实践,为盐碱地的改良和防治提供理论依据,以保证农业生产的正常进行。

参考文献:

- [1] Zhang D F, Wang S J. Mechanism of freeze-thaw action in the process of soil salinization in northeast China[J]. Environmental Geology, 2001, 41(1,2):96-100.
- [2] 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):70-73.
- [3] 史海滨,赤江刚夫,长堀金造,等.盐分再分配条件下河套灌区冲洗水量的数值模拟(英文)[J].农业工程学报,2002,18(5):67-72.
- [4] Wang L P, Akae Takeo. Analysis of ground freezing process by unfrozen water content obtained from TDR date in Hetao Irrigation District of China[J]. Jpn Soc Soil Phys, 2004, 98:11-19.
- [5] 黄兴发,王千,曾德超.冻期土壤水盐热运动规律的实验研究[J].农业工程学报,1993,9(3):28-33.
- [6] 李瑞平.冻融土壤水盐运移规律及其 SHAW 模型模拟研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [7] Li R P, Shi H B, G. N. Flerchinger, et al. Simulation of freezing and thawing soils in inner mongolia Hetao Irrigation District, China[J]. Geoderma, 2012, 173-174:28-33.
- [8] 张殿发,郑琦宏.冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J].地理科学进展,2005,24(4):46-55.
- [9] 张殿发,郑琦宏,董志颖.冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J].水土保持通报,2005,25(6):14-18.
- [10] 彭振阳,黄介生,伍靖伟,等.秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J].农业工程学报,2012,28(6):77-81.
- [11] Wiggert DC, Andersland OB, Davies SH. Movement of liquid contaminants in partially saturated frozen granular soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(2):111-117.
- [12] 雷志栋,尚松浩,杨诗秀,等.土壤冻结过程中潜水蒸发规律的模拟研究[J].水利学报,1999,(6):6-10.
- [13] 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.
- [14] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.季节性冻融期土壤水盐动态预测 BP 网络模型研究[J].农业工程学报,2007,23(11):125-128.
- [15] 白岗栓,杜社妮,于健,等.激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J].农业工程学报,2013,29(8):125-134.
- [16] 杨松,刘俊林,陶娜,等.河套灌区春玉米农业气候条件分析及适生种植区划[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):98-101.
- [17] 陈民生,耿忠义,赵京岚.温度对玉米种子萌发特性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2007,38(2):196-202.
- [18] 徐田军,董志强,兰宏亮,等.低温胁迫下聚糖萜合剂对玉米幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].作物学报,2012,38(2):352-359.
- [19] 孟宪欣,王洪刚,方仁柱.水分对玉米种子发芽及苗期生长的影响[J].安徽农学通报,2008,14(4):40,52.
- [20] 侯玉虹,尹光华,刘作新,等.土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响[J].安徽农学通报,2007,13(1):70-73.
- [21] 郑秀清,陈军锋,邢述彦,等.季节性冻融期耕作层土壤温度及土壤冻融特性的试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3):65-68.
- [22] 靳志峰,虎胆·吐马尔白,牟洪臣,等.土壤冻融温度影响下棉田水盐运移规律[J].干旱区研究,2013,30(4):623-627.