文章编号:1000-7601(2016)05-0269-06

冻融期膜下滴灌棉田水盐时空动态特征研究

虎胆·吐马尔白¹,赵永成²,马合木江·艾合买提¹ (1.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆乌鲁木齐 830052;

2.中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:利用经典统计学方法,分析了冻融期北疆地区常年滴灌棉田土壤水分、盐分时空动态变化特征。结 果表明:在整个冻融期,裸地处理的含水率随时间变异性较覆膜处理大;在最大冻土深度(90 cm 土层)附近,土壤盐 分随时间变异剧烈,属于强变异性,变异系数高达1.1 左右;在深度方向上,土壤含水率呈中等变异性,而土壤含盐 率则呈强变异性;在整个冻融过程中,冻结带中盐分随时间和深度的变化幅度较小;冻融期土壤存在稳定盐分累积 层,该累积层的深度在120 cm 土层,且不受地表覆盖的干扰。覆膜对120 cm 土层以下土壤盐分运移影响较小。

关键词:变异系数;冻融期;滴灌棉田;水盐;变化特征

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Study on spatial and temporal variabilities of soil moisture and salt during freeze-thawing period in cotton field with drip irrigation

Hudan Tumarbay¹, ZHAO Yong-cheng², Mahemujiang Aihemaiti¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Ecology and Geography Institute, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The coefficient of variation of the classical statistics was used to analyze the spatial-temporal dynamic variability characteristics of soil moisture and salinity content in the cotton field of Shihezi district in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. The results indicated that during the whole freezing and thawing period, for all soil layers, the coefficient of variation in soil moisture with bare land treatment (L) was higher than that with the mulching treatment (M). At the maximal depth of frozen soil layer around 90 cm, soil salinity exhibited strong variability with a coefficient of variation up to 1.1. Soil content demonstrated moderate variability in the vertical profile, and salinity content presented strong variability. During the whole freezing and thawing period, changes of salinity in frozen zone varied little with both bare land and mulching treatment, the 120 cm soil layer was stable for salinity accumulation, indicating that mulching had no significant effect on the layer beneath 120 cm. The results in this paper could be considered as a theoretical basis for prevention of the secondary salinization in soil, which would be conducive to the sustainable and safety use of the local farmland.

Keywords: coefficient of variation; freeze-thawing period; cotton field with drip irrigation; soil moisture and salinity

季节性冻土中的水分运动作为自然界水分循环 的一个重要环节,在农业、水资源及环境领域有着重 要的地位。冻融循环引发了土壤结构的改变,导致 土壤水盐的重新分配,影响土壤水分入渗和蒸发。 国外对于冻融条件下土壤物理化学特征的研究进行 的较多。Watanabe等^[1]针对冻融土壤中微生物活性 进行了研究,认为在土壤冻结过程中,土壤微生物活 性随着温度的降低而降低,并且微生物的分布随着 冻结带的发育而变化。P.P. Overduin^[2]等利用土壤 温度对热的反应原理测量了冻融条件下的热导率。 Klas Hansson 等^[3]对于冻融土壤中水分及热运移问 题进行了研究。还有学者认为^[4-6],冻土形成的过 程对于土壤碳、氮的循环有着直接影响。新疆北疆 地区的石河子市一直都是我国优质棉花生产供应基 地,其所属的 121 团是我区最早实施棉花膜下滴灌 的地区。长期以来,由于当地农业发展受土壤盐碱 化及次生盐渍化问题的困扰,使得棉花产量和质量 都受到不同程度的影响,长此以往,这一问题将会严

收稿日期:2015-05-15

基金项目:国家自然科学基金(51069033);自治区地方公派出国留学成组配套项目

作者简介:虎胆·吐马尔白(1961—),男,哈萨克族,教授,博导,主要从事地下水、土壤水盐运移理论及节水灌溉理论。E-mail:hudant@hotmail.com。

重影响当地农业的可持续发展。而冻融作为诱发土 壤次生盐渍化的一个重要因素越来越受到学者们的 关注。因此,做好冻融期滴灌棉田土壤水盐的长期 监测工作尤为重要。

近些年来,国内已经有许多学者针对生育期土 壤水盐运移问题进行了大量研究并取得了许多成 果。有学者针对干旱区膜下滴灌棉田水盐运移及分 布特征进行了研究^[7-10],李明思等人^[11-13]针对长 期膜下滴灌棉田土壤水盐累积特征进行了长期监 测,以分析土壤盐分随滴灌种植年限的变化。但是, 对于冻融期滴灌棉田土壤水盐运移规律的研究工作 进行的较少。新疆北疆地区地处我国季节性冻土 区,每年冻融期长达5个月之久,最大冻土深度为 80 cm 左右^[14],因此,研究冻融条件下滴灌棉田土壤 水盐运移及分布特征对于防治土壤次生盐渍化有重 要意义。方汝林^[15]就土壤冻结、消融期水盐动态进 行了初步研究,分析了土壤冻结、消融期水盐运移的 规律,提出了控制春季土壤返盐的措施。黄兴发 等[16]对冻融期土壤水热盐运移进行了数值模拟,认 为土壤冻融对早春土壤表层聚盐有重要作用,如果 不采取措施,冻融期内聚集的水分将会在土壤融化 后强烈蒸发,可能会引发早春土壤次生盐渍化。张 殿发[17]等人对冻融条件下土壤水盐运移机理进行 了研究,发现在土壤冻结期,盐分的运移和初始土壤 含水率、土壤溶质浓度、盐分组成、土壤温度及热梯 度等因素有关。而土壤温度是盐分运移的主要驱动 力,它会使保持在冻结带中的盐分在消融期向土壤 表层运移。李瑞平[18-19]等研究了冻融期温度与土 壤水盐运移的关系,以及干旱寒冷地区土壤水盐的 空间变异特征。郑秀清,樊贵盛等^[20-21]针对土壤 含水率及地下水埋深对于冻土入渗特性的影响进行 了研究。靳志峰^[22]等研究了冻融期滴灌棉田土壤 水盐运移与温度的关系,及雪水入渗对水盐运移的 影响。对于土壤水盐的时空变异性研究,李小昱^[23] 等人用经典统计方法计算了土壤含水率均值、标准 差、变异系数等统计特征值,但该方法不能定量的描 述土壤特性的空间变异性。徐英等^[24]认为,夏灌前 和秋浇前土壤盐分均属中等变异性,两个时期水分 和盐分都具有空间自相关性。雷晓云等^[25]研究发 现,不同深度平面上,土壤含水率的变异大小不仅与 所处土层深度有关而且与施测的时间有关。王树仿 等人^[26]针对膜下滴灌水分的时空变异规律进行了 研究。近些年,地统计学在土壤特性空间变异研究 中得到了广泛的应用, V. A. Sidorova 等^[27-28]利用 地统计学方法分析了土壤、作物及地下水等因素的 空间变异性。徐英^[29]等研究发现,土壤水盐的各向 异性特征在实验区或与之相似的地区可以简化为各 向同性,此方法能简化分析计算的过程。李敏等 人^[30]利用经典统计学、地统计学及相似理论研究了 在不同尺度网格下膜下滴灌棉田土壤水盐的空间变 异性。本研究通过对越冬期新疆石河子垦区滴灌棉 田水盐的动态监测,利用经典统计学理论,定性分析 冻融条件下,土壤中水分和盐分随时间及空间的动 态变化特征,以便使当地农民采取合理措施,为防治 早春土壤次生盐渍化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在新疆石河子市农八师 121 团进行,该 团位于天山北麓,准噶尔盆地南缘,地处欧亚大陆腹 地(44°46′55″N,85°32′50″E,平均海拔 337.1 m)。该 地区夏季炎热,极端最高气温 43.1℃;冬季寒冷,极 端最低气温 – 42.3℃;常年干旱缺水,光照充足,蒸 发强烈,年降雨量为 141.8 mm,年蒸发量为 1 826.2 mm,年均日照数约为 2 862 h,无霜期平均为 167 d, 具有典型的大陆性荒漠气候的特点。本试验田土壤 质地自地表以下依次为粉沙壤土、粘土和砂粘壤土, 0~30 cm 为粉沙壤土,土壤平均容重 1.40 g·cm⁻³, 30~100 cm 土层为砂粘壤土,平均容重为 1.33 g· cm⁻³。

1.2 试验方法

本试验实施时间为 2012 年 11 月 22 日至 2013 年3月24日。试验地块为滴灌年限12年(2001年 开始实施膜下滴灌灌水模式)的棉田。试验于2012 年11月22日(即下雪前)在棉田中央选地,地块覆 盖一张 10 m×10 m 的塑料薄膜用以阻隔积雪(M 处 理),并在薄膜旁边选取一块 10 m×10 m 的裸地作 为对照处理(L处理),每个处理设三个重复。取土 时间为 2012 年 11 月 22 日、2012 年 12 月 18 日、2013 年1月12日、2013年3月1日、2013年3月10日、 2013年3月14日、2013年3月17日、2013年3月20 日、2013年3月24日,共计9次;取土深度为10、20、 40、60、90、120、150 cm 七个土层。每个处理设一个 取样点,取样点均位于小区中心位置,每个处理采用 相同的取样方式。每次取样后利用烘干法测出土壤 的质量含水率(smc)(温度 105℃下烘 8 小时左右), 质量含水率的计算公式如下: smc = (湿重 - 干重)/ 干重×100%。然后将烘干土样磨碎、过筛,按水土 比 5:1(蒸馏水 90 ml, 土 18 g)制取土壤浸提液,利用

DDS-307型电导率仪测定溶液的电导率,然后换算 成土壤总含盐率。换算公式为: Y = 0.0006X - $0.0282(R^2 = 0.9486)_{\odot}$

结果与分析 2

2.1 冻融期含水率、含盐率随时间变异性

变异系数 Cv 的大小反映了随机变量的离散程



图 1 含水率及含盐率随时间变异系数

Fig.1 Moisture and salinity coefficients of variation over time

在整个冻融期,各土层含水率随时间的变异系 数随深度的变化比较明显图 1(a)。两处理中, Cv 值 的整体变化趋势一致。各土层含水率随时间的变异 系数 C_v 值,L 处理的皆大于相应深度 M 处理的值, 这可能是由于 M 处理中薄膜对积雪的阻隔作用及 保温隔热作用导致的。两处理分别在 60 cm、150 cm 处出现变异系数峰值,峰值 Cv 值都小于 0.5 图 1 (a),故两者都呈现中等变异性。峰值的出现说明, 在整个越冬期内,60、150 cm 土层中,样本数据比较 离散,含水率随时间变化最为明显,且各监测时间点 的含水率值差异较大。90 cm 以下土体,含水率 Cv 值呈现出随深度的增加而增大的趋势图 1(a)。据 靳志峰等^[14]人研究发现,当地冻土深大约为 80 cm 左右。由此可以判断,90 cm 以下土层为非冻层,说 明在冻结带下界面以下的土壤中水分随时间变异性 会随深度的增大有增大趋势。而由图 1(b)含盐率 随时间变异系数图可知,L处理和 M 处理中,含盐率 Cv 值整体变化趋势相同,分别在 90 cm 土层出现峰 值,峰值高达1.1左右,呈强变异性。这可能是因为 90 cm 土层恰好位于冻结土体的下界面附近。在土 壤还未达到当地冻土深度时,非冻层的水分在温度 梯度作用下向冻结带运移,而相对于 80 cm 的冻土 深度而言,90 cm 土层是土壤水盐向上层土壤运移 的必经土层;当冻结带发育停滞后,大量盐分聚集在

冻结层下界面,即90 cm 土层附近;当土壤开始消融 后,冻结带中的水盐又呈现上渗-下渗型运移态势, 下渗部分的水分同样首先经过 90 cm 土层向下运 移,而水分是盐分运移的载体,因此,这一土层的土 壤盐分在消融期又出现较大变化。同时,试验区春 季气温回升速度较快,土壤蒸发强烈,会出现潜水蒸 发的可能,使得下面土体中的水盐再度在外界蒸发 作用下出现上移现象,以上因素综合作用下,导致在 整个冻融期这一土层盐分变化较为剧烈。而在除 90 cm 土层以外的土壤中,含盐率随时间的 Cv 值随 深度变化较小,Cv值都在0~0.5范围内,属于中等 变异。60~150 cm 土层中呈现出 M 处理的含盐率 C_v 值大于 L 处理的趋势, 这与含水率 C_v 值的变化 趋势刚好反,这可能与土壤温度有关。在冻融期,温 度是土壤水盐运移的主要驱动力,然而,由于塑料薄 膜的存在,使得 M 处理土壤温度较 L 处理相应土层 的高,因此,才会导致 M 处理中盐分变化较 L 处理 活跃的现象。

度,及土壤特性空间变异的大小。一般对变异系数 Cv值的评估^[30],当Cv≤0.1时,称弱变异性,0.1≤

Cv≤1.0 为中等变异性,Cv>1.0 为强变异性。为了 分析冻融期含水率及含盐率随时间的变异性,这一

部分在分析数据时,将同一土层,不同时期的观测数

据作为样本数据,得出其变异系数 Cv 值,处理结果

100

120

2.2 冻融期含水率、含盐率在铅垂方向的变异性

为分析土壤水盐在深度方向的变异性,本试验 在数据处理时,将同一取样点的土壤含水率及含盐 率值进行了方差分析,得出其变异系数 Cv 值,处理 结果见图 2(a)、图 2(b)所示。



图 2 土壤含水率及含盐率在铅垂方向变异系数

Fig.2 Coefficients of variation characteristics of soil moisture and salt along vertical direction

由图 2(a)含水率在铅垂方向变异系数图可知, 含水率在深度方向的变异系数 C_v 值皆为 $0.1 \leq C_v$ ≤0.6,因此,含水率在深度方向上呈现出中等变异 性。从 2012 年 11 月 22 日到 2013 年 3 月 1 日,L 处 理的含水率 Cv 值呈现出随着时间的推后而有增大 的趋势,M处理的含水率在深度方向的变异性较小, 其Cv曲线几乎与水平轴平行,这可能与土壤冻融 机理有关。在土壤冻结带发育的过程中,由于薄膜 的保温隔热作用,使得 M 处理的冻融速度较 L 处理 的小,因此,在同一时间,L处理的Cv值大于M处理 的。而在 2013 年 3 月 1 日到 3 月 24 日期间, L 处理 Cv曲线的变化幅度大于 M 处理,这可能是由于这 一时段外界气温变化导致的。试验区在这一时段气 温上升较快,外界蒸发作用强烈,加之在消融阶段出 现的交替冻融,使得这一时段含水率在深度方向变 化较为剧烈。

由图 2(b)含盐率在铅垂方向变异系数图可知, 随着观测时间的推后,盐分在深度方向的 C_V 值有 增大的趋势,相比之下,L处理的 C_V 值曲线较 M 处 理的变化幅度大。说明两处理中,L处理的盐分在 深度方向上的变化更显著,这可能与冻融期积雪及 土壤温度变化有关系,温度梯度的大小直接影响水 分运移的速度,间接地影响到了盐分在土壤中的变 异程度。图 2(b)中,含盐率的 C_V 值大多在 1.0 以 上,因此,在冻融期,盐分在深度方向呈现出强变异 性。

2.3 冻融期土壤水盐变化趋势

图 3(a)、图 3(b)为冻融期土壤含水率变化图, 由图可知,在铅垂剖面上,L处理和 M 处理的含水率 变化趋势相同,都呈现出随深度的增加先减小,后增 大,再减小的趋势,相应的含水率峰值大都出现在表 层 10 cm 和 120 cm 土层。在 10 cm 土层中,各时期 平均含水率值 L 处理的含水率要比 M 处理的大,其 平均值分别为 18%、14%。这可能是由于积雪融化 后,融雪水入渗补给导致的。而在 120 cm 土层出现 含水率峰值,这可能是土壤冻结和消融共同作用的 结果。因为在土壤冻结期,下层土壤水分在水势梯 度的作用下不断向冻结层运移,当达到最大冻土深 度以后,下层非冻结土壤中的水分会聚集在冻土深 度(即 80 cm)以下的土体中,而 120 cm 土层恰好位 于这一土体。当土壤进入消融期后,冻结带下界面 的土壤水分呈下渗型运移特征,这使得位于冻结层 以下的 120 cm 土层中出现了含水率峰值。

图 3(c)、图 3(d)为冻融期每一观测日土壤含盐 率变化图,由图3(c)、图3(d)可以看出,L处理与M 处理的含盐率在深度方向的变化趋势与幅度基本相 同,在0~90 cm 各土层,各观测期的含盐率值在深 度方向上相差不大,都呈现出随深度的增加曲线基 本与纵轴平行,且含盐率值较低,皆保持在2g·kg⁻¹ 范围内。由前面分析可知,这一土体属于在冻结带 范围内,由此可以推测,在整个冻融期间,冻结带中 的盐分随深度和时间变化幅度较小。由图 3(c)、图 3(d)可以看出,两处理都在120 cm 土层出现了各观 测期的峰值,在这一土层,覆膜处理的含盐率的最大 值与最小值(12、4.97 g·kg⁻¹)都比裸地处理的(9.8、 2.6 g·kg⁻¹)大。一方面,峰值出现在 120 cm 土层这 一现象可以说明,在冻融期,120 cm 土层是土壤盐 分稳定积聚区,且这一峰值区并不随时间而改变,这 同时也说明,在相同的条件下,不同处理方式(覆膜 与裸地)并不影响盐分在冻融期积聚区的分布。另 一方面,由120 cm 土层的覆膜处理的最值皆大于裸 地处理这一现象可以看出,两处理在含盐率大小上

还是有一定的差异,但这种差异究竟是不是由于覆 膜而导致的,这一问题有待于在今后的研究中进一 步去求证。



图 3 全观测期土壤含水率、含盐率变化



由图 3 可以发现,不论是土壤含水率还是含盐 量,都在 120 cm 土层出现了峰值,并且在整个冻融 期内其峰值出现的位置并不随时间变化,都稳定在 120 cm 土层中。

3 结 论

1) 全观测期含水率随时间的变异性发现,裸地 处理的含水率随时间变异系数都较覆膜处理的大, 说明在相同条件下,裸地处理更容易受外界融雪及 外界气温等因素的影响。但由于冻融期水分及盐分 在土壤中的运移受土壤结构、初始含水率、含盐率及 温度等各种因素的影响,对这些因素对冻融土壤水 盐运移的作用机理,有待于在后期试验中做进一步 研究。

2) 全观测期中,裸地处理和覆膜处理含盐率随时间动态变异系数都在 90 cm 土层出现峰值,呈强变异性。而除 90 cm 以外的其他土层,含盐率随时间动态变化呈中等变异特征,变幅较小。在冻结带

的下界面附近,土壤盐分运移活动较活跃。

 3)含水率随深度变化呈中等变异性,而含盐率 呈强变异性,这说明在深度方向上,含盐率变化要比 含水率变化复杂。

4) 在整个冻融期内,处于冻结带中的盐分随时 间和土层深度的变化较小,含盐率大多在2g·kg⁻¹ 的范围内。120 cm 土层为整个冻融期内盐分稳定 累积层。覆膜对于冻融期盐分累积层的分布没有影 响,但对累积层中的盐分值的大小有影响。

参考文献:

- Watanabe K, Ito M. In situ observation of the distribution and activity of microorganisms in frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008,54(1):1-6.
- [2] Overduin P P, Kane D L, W.K.P. van Loon. Measuring thermal conductivity in freezing and thawing soil using the soil temperature response to heating[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006,45 (1):8-22.
- [3] Klas Hansson, Jirka Šimunek, Masaru Mizoguchi, et al. Water flow

and heat transport in frozen soil[J] Vadose Zone Journal, 2004, 3(2): 693-704.

- [4] IPCC. Climate Change Synthesis Report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:24-74.
- [5] CHENG H Y, WANG G X, HU H C, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River[J]. China Environmental Geology, 2008, 54: 1755-1762.
- [6] 虎胆·吐马尔白,弋鹏飞,王一民,等.干旱区膜下滴灌棉田土壤 盐分运移及累积特征研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(5): 144-151.
- [7] 周和平,王少丽,姚新华,等.膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布 特征及排盐效应研究[J].水利学报,2013,44(11):1380-1388.
- [8] 王春霞,王全九,刘建军,等.微咸水滴灌条件下土壤水盐分布 特征试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):30-35.
- [9] 王 毅,王久生,李爰卓.微咸水膜下滴灌对绿洲棉田土壤水盐 特征的影响[J].西北农业学报,2011,20(12):158-162.
- [10] 虎胆·吐马尔白,谷新保,曹 伟,等.不同年限棉田膜下滴灌 水盐运移规律实验研究[J].新疆农业大学学报,2009,32(2): 72-77.
- [11] 李明思,刘洪光,郑旭荣.长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变 化[J].农业工程学报,2012,28(22):82-87.
- [12] 谭军利,康跃虎,焦艳平,等.不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土 壤盐分离子分布特征[J].农业工程学报,2008,24(6):59-63.
- [13] 靳志锋,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.
- [14] 方汝林.土壤冻结、消融期水盐动态的初步研究[J].土壤学报,1982,19(2):164-172.
- [15] 黄兴法,曾德超.冻结期土壤水盐热运动规律的数值模拟[J]. 北京农业工程大学学报,1993,13(3):43-50.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] 李瑞平,史海滨,付小军,等.干旱寒冷地区冻融期土壤水分和 盐分的时空变异分析[J].灌溉排水学报,2012,31(3):86-90.
- [19] 郑秀清,樊贵盛.土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):52-55.
- [20] 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,(3):21-26.
- [21] 靳志锋,虎胆·吐马尔白,马合木江,等.积雪消融对北疆棉田 土壤水盐运动的影响研究[J].新疆农业大学学报,2013,36 (2):169-172.
- [22] 李小昱, 雷廷武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及分形 特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4):61-65.
- [23] 徐 英,陈亚新,周明耀.不同时期农田土壤水分和盐分的空 间变异性分析[J].灌溉排水学报,2005,24(3):30-34.
- [24] 雷晓云,申祥民,李 彦,等.滴灌方式下棉田土壤水分变异性 研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3):9-11.
- [25] 王树仿,缴锡云,王维汉,等.膜下滴灌田间土壤水分时空变异 规律研究[J].灌溉排水学报,2009,28(5):34-37.
- [26] Sidorova V A, Zhukovskii E E, Lekomtsev P V, et al. Geostatistical analysis of the soil and crop parameters in a field experiment on precision agriculture[J]. Agricultural Chemistry and Soil Fertility, 2012, 45(8):783-792.
- [27] Ehsan Sahebjalal. Application of geostatistical analysis for evaluating variation in groundwater characteristics[J]. World Applied Sciences Journal, 2012, 18(1):135-141.
- [28] 徐 英,陈亚新.土壤水盐特性空间变异的各向同性近似探讨 [J].灌溉排水学报,2003,22(4):14-24.
- [29] 李 敏,李 毅,曹 伟,等.不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐 的空间变异性分析[J].水利学报,2009,40(10):1210-1218.
- [30] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学 出版社,1988.

- [5] 毕经伟,张佳宝,陈效民,等.应用 HYDRUS 1D 模型模拟农田 土壤水渗漏及硝态氮淋失特征[J].生态与农村环境学报, 2004,(2):28-32.
- [6] 刘玉春,李久生.层状土壤条件下地下滴灌水氮运移模型及应 用[J].水利学报,2012,(8):898-905.
- [7] Simunek J M, Sejna T, van Genuchten M Th. The HYDRUS 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[M]. Version 2.0. Riverside, California: Colorado School of Mines Publishers, 1998.
- [8] Feddes R A, Bresler E, Neuman S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems [J]. Water Resour Res, 1976,10(6):1199-1206.

- [9] Allen R G, Smith M, Perier A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration[J]. Journal of Environmental Science and Health Par., 1994,43:1-35.
- [10] 北京农业大学农业气象专业.农业气象学[M].北京:科学出版社,1982.
- [11] 朱新军.内蒙古孪井灌区土壤水分运移及节水灌溉模式的研 究[D].青岛:中国海洋大学,2004.
- [12] Childs S W. Model of soil salinity effects on crop growth[J]. Soil Sci Soc Am, 1975,39(4):617-622.
- [13] 王石立.冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用[J]. 应用气象学报,1998,(1):15-23.
- [14] 赵娜娜,刘 钰,蔡甲冰.夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J].水利学报,2010,(8):953-959.