

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.01.010

# 微咸水波涌畦灌对土壤水盐分布的影响\*

吴忠东<sup>1</sup> 王全九<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255048; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**【摘要】** 根据2005年在中国科学院南皮生态农业试验站的田间试验结果,对灌溉后土壤剖面和沿畦长方向的水盐分布进行了研究。结果表明,当灌水量相同时,灌水结束后波涌灌和连续灌0~100 cm土层含水率在整个畦田上存在较大差别。比较灌水均匀度的结果可知,供水时间为90 min时, $N=3$ , $r=1/2$ , $T_{on}=30$  min的处理含水率离散程度最小,灌水均匀度最满意。从主根区含盐量的变差系数来看,连续灌明显高于波涌灌,说明微咸水的波涌灌在畦首到畦尾的盐分分布离散程度低于连续灌。因此灌水方式的改变在不增加灌水量的条件下改善了土壤水盐分布状况。

**关键词:** 微咸水 波涌灌 含水率 含盐量 均匀度

中图分类号: S274.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0053-06

## Effect of Saline Water Surge Flow Border Irrigation on Soil Water-salt Distribution

Wu Zhongdong<sup>1</sup> Wang Quanjiu<sup>2</sup>

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255048, China)

(2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

### Abstract

Based on field experiment in Nanpi ecological experimental station of Chinese Academy of Sciences, the soil water salt distribution of post-irrigation both on soil profile and along the border was studied. The results showed that, when precipitation rate was the same, the moisture content in 0~100 cm soil layer presented difference between surge flow irrigation and continuous irrigation. The uniformity of water application was compared, and the best irrigation condition was observed when all water supply period were 90 min, which was  $N=3$ ,  $r=1/2$ , and  $T_{on}=30$  min. Meanwhile the soil moisture content had minimal dispersion degree, and the uniformity of water application was the most satisfactory. The taproot region salt content of continuous irrigation was apparently higher than surge flow irrigation from variation coefficient, which means that the salt distribution dispersion degree of surge flow irrigation was lower than that of continuous irrigation from border initial to border end. Changing irrigation method from continuous irrigation to surge flow irrigation can improve water salt distribution pattern under the condition of same precipitation rate.

**Key words** Saline water, Surge flow irrigation, Soil moisture content, Soil salt content, Uniformity

### 引言

目前我国北方地区农业发展面临的主要问题是

缺水和土壤盐渍化问题,因此水土资源高效利用是保持当地农业可持续发展的重要研究目标<sup>[1]</sup>。宁夏、甘肃、内蒙古、陕西、河南、河北、山东、新疆、辽宁

收稿日期: 2009-03-09 修回日期: 2009-05-11

\* 国家自然科学基金资助项目(50879067)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-003)

作者简介: 吴忠东,副教授,博士,主要从事微咸水的地面灌溉及环境效应研究,E-mail: wuzhongdong@126.com

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程方面研究,E-mail: wquanjiu@163.com

等省区,都有利用微咸水灌溉的试验和生产实践<sup>[2]</sup>。大量试验结果表明,咸水灌溉虽然比淡水灌溉减产,但比旱作增产<sup>[3]</sup>。为了提高水资源利用效率,除了优化灌溉管网的方法之外<sup>[4]</sup>,在畦田灌溉中采用波涌灌溉技术是科学利用微咸水,避免土壤次生盐渍化趋势的有效途径<sup>[5]</sup>,而且有利于当地农业生产向生态农业方向发展<sup>[6]</sup>。波涌灌是1979年Stringham和Keller首先提出的适合旱作灌溉的一种新型地面灌水技术<sup>[7]</sup>。波涌畦灌灌水过程与传统畦灌灌水过程的不同之处是畦田间歇性地受水和停水;而传统畦灌则一次性地将灌水输入畦田<sup>[8]</sup>。大量研究结果表明它具有省水节能、灌水均匀和田间水利用率高等优点<sup>[9]</sup>。波涌灌作为一种先进的节水型地面灌水技术,与传统灌溉技术相比,累积入渗量可减少15%~30%<sup>[10]</sup>。波涌灌的水流运动规律<sup>[11]</sup>、入渗机理<sup>[12]</sup>、土壤物理性质的变化<sup>[13]</sup>和循环率对土壤入渗特性的影响<sup>[14]</sup>等已经取得了一些研究成果。但关于波涌灌尤其是微咸水的波涌灌对土壤的水盐分布影响研究较少,根据2004~2005年在中国科学院南皮生态农业试验站进行的大田波涌灌畦灌试验,对灌溉后土壤剖面和沿畦长方向的水盐分布进行研究。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验材料

微咸水大田波涌灌溉试验于2004~2005年在中国科学院南皮生态农业试验站西侧进行,种植作物为冬小麦,底墒水为淡水,灌水量为60 mm。田间持水量采用田间实际铁框测定法,本试验的田间持水量为24.1% (质量含水率)。试验采用矿化度为3 g/L的微咸水进行灌溉,土壤基本物理性质如表1所示。微咸水波涌灌试验采用深井和浅井两个水源供水,其矿化度与流量如表2所示。

表1 土壤基本物理性质  
Tab.1 Soil physical properties

深度 /cm	各级颗粒含量百分数/%			土壤质地*
	$d \geq 0.02$ mm	$0.02$ mm $> d \geq 0.002$ mm	$d < 0.002$ mm	
0~67	60	22.51	7.5	砂质粘壤土
67~100	52	20.8	27.4	壤质粘土

注:\*土壤质地分类参见国际分类标准。

表2 供水水质和流量

Tab.2 Water quality and flow rate of irrigation water

水源	电导率/ $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$	矿化度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	单宽流量/ $\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$
深井	1.3	0.92	2.13
浅井	7.4	5.131	3.08

注:单宽流量为深井和浅井的流量与畦宽的比值。

## 1.2 试验设计

据1965~1985年20年的降水资料分析,该区丰水年( $P=25\%$ )降水量710.2 mm,平水年( $P=50\%$ )为490.3 mm,枯水年( $P=75\%$ )为459.8 mm<sup>[15]</sup>。但降水是一随机事件,同样是75%的降水频率,降水年内分配不同,对作物影响各不相同,所以本文在分析研究冬小麦消耗土壤水分时主要考虑生育期内降水量的丰缺,根据冬小麦在生育期内降水量把生育期所在年份分为偏旱年、一般年和湿润年,对试验区域1995~2005年10年的降水资料进行频率分析,如表3所示。

表3 生育期降水频率分析

Tab.3 Analysis of rainfall frequency in growing period

排序	年度	生育期降水量/mm	排频
1	2003~2004	347.7	0.09
2	1997~1998	248.9	0.18
3	1995~1996	239.2	0.27
4	2000~2001	230.4	0.36
5	1999~2000	190.3	0.45
6	1996~1997	141.2	0.55
7	1998~1999	131.1	0.64
8	2001~2002	116.3	0.73
9	2002~2003	114.4	0.82
10	2004~2005	79.4	0.91

由表3的排序情况,结合本地区实际情况以及他人研究成果可知<sup>[16-17]</sup>,2004~2005年为生育期偏旱年。因此试验设计的灌水次数为3次,即在整个生育期按拔节期、抽穗期、灌浆期进行3次灌溉,灌水时间分别为2005年4月8日、5月3日和5月25日,灌溉方案如表4所示。

### 1.3 观测内容和取样方法

选有代表性的畦田,每个生育期灌水前后,沿畦长分别在距畦首距离2、20、40、60、80 m处分5层取土,每层20 cm,取土深度为100 cm,测量土壤含水率与含盐量。在畦口处安装水表记录流量。灌水前沿畦长方向每5 m作为一个测点,在放水开始后用秒表记录水流前锋到达各测点的时间及水流消退时间和位置。

## 2 结果及分析

### 2.1 微咸水波涌灌土壤含水率分布特征

为了定量分析沿畦长各点土壤剖面含水率的变化情况,对连续灌和波涌灌拔节水后0~100 cm剖面土壤含水率均值和变差系数进行对比,其中标准差的计算公式为

表 4 2005 年微咸水波涌灌溉试验方案  
Tab. 4 Scheme of surge flow irrigation with saline water in 2005

生长期	处理号	$N$	$r$	$T_{\text{opp}}/T_{\text{on}}$ /min	单宽流量 /L·(s·m) <sup>-1</sup>
拔节水	E6C	1		90/90	1.75
	E7S	2	1/3	90/45	
	E19S	3	1/2	90/30	
	E12S	4	1/3	88/22	
抽穗水	E9C	1		60/60	2.22
	E6C	1		90/90	
	E7S	2	1/3	90/45	
	E19S	3	1/2	90/30	
	E12S	4	1/3	88/22	
	E1S	2	1/2	60/30	
灌浆水	E2C	1		100/100	2.22
	E18S	3	1/3	90/30	
	E6C	1		90/90	
	E7S	2	1/3	90/45	
	E19S	3	1/2	90/30	
	E12S	4	1/3	88/22	
	E16S	2	1/2	90/30	

注: C 代表连续灌, S 代表波涌灌,  $N$  为周期数,  $r$  为循环率,  $T_{\text{opp}}$  为净供水时间,  $T_{\text{on}}$  为周期供水时间。

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (\theta_i - \bar{\theta})^2}$$

式中  $\theta_i$ ——第  $i$  层土壤的质量含水率, %

$\bar{\theta}$ ——某一点 0 ~ 100 cm 深度土壤剖面平均质量含水率, %

为了比较剖面各层的含水率离散程度, 采用变差系进行分析。净供水时间为 90 min 的连续灌和波涌灌拔节水后距离畦首不同长度的取样点 0 ~ 100 cm 土壤含水率的平均值、标准差和变差系数如表 5 所示。

由表 5 可以看出, 连续灌和波涌灌拔节水后各点 0 ~ 100 cm 剖面土壤含水率均值绝大多数均高于适宜含水率(田间持水量的 80%), 多余的水分以无效蒸发的方式进入大气, 因此灌水量可以适当减少; 其次, 距畦首不同长度的土壤含水率的变差系数中, 距畦首小于等于 40 m 的取样点剖面含水率的变差系数的规律为连续灌小于波涌灌, 即在其他条件相同时, 距畦首小于等于 40 m 的连续灌土壤剖面含水率离散程度低于波涌灌, 这是因为连续灌在不间断供水过程中, 距离畦首越近的取样点水分入渗的时间越长, 由于没有致密层的减渗作用, 距畦首小于等于 40 m 的土壤得到了充分的渗透, 因此各取样点 5 层土壤含水率差异较小, 变差系数较小, 而波涌灌

间歇性供水形成的致密层对下个周期的水流推进起到了减渗的作用, 深层土壤没有得到充分湿润, 因此波涌灌 0 ~ 100 cm 剖面含水率离散程度较高; 但距畦首 60 m 处连续灌土壤含水率变差系数比 0 ~ 40 m 明显增大, 因为连续灌的水流推进距离最大 62 m, 水流推进的末端土壤入渗水量较小, 表层相对含水率达到 92.84%, 水分呈现上湿下干的空间分布状态, 连续灌在距畦首 80 m 处无水通过, 由于表层土壤的强烈蒸发, 表层土壤相对含水率仅为 31.74%, 深层土壤含水率维持灌前状态, 即使标准差相同的情况下, 由于含水率平均值最小, 因此变差系数为最大值。

表 5 0 ~ 100 cm 土壤剖面质量含水率的统计值

Tab. 5 Statistics of soil mass moisture contents in 0 ~ 100 cm depth

处理号	距畦首距离/m	平均值	标准差	变差系数
E6C	2	0.259 9	0.019 8	0.076 0
	20	0.257 3	0.024 3	0.094 3
	40	0.247 9	0.036 1	0.145 5
	60	0.207 9	0.064 8	0.284 5
	80	0.134 9	0.059 1	0.480 4
E7S	2	0.243 4	0.020 1	0.082 5
	20	0.231 5	0.030 8	0.102 7
	40	0.221 3	0.043 8	0.100 3
	60	0.215 5	0.049 8	0.203 4
E19S	80	0.155 6	0.022 2	0.319 7
	2	0.249 2	0.020 8	0.083 5
	20	0.239 8	0.025 3	0.105 3
	40	0.234 9	0.035 4	0.150 9
E12S	60	0.220 7	0.053 5	0.242 6
	80	0.201 5	0.057 7	0.286 4
	2	0.248 0	0.013 4	0.053 8
	20	0.236 4	0.035 0	0.147 8
E16S	40	0.198 9	0.036 3	0.182 6
	60	0.188 8	0.048 0	0.254 0
	80	0.176 5	0.049 9	0.282 8

E7S 土壤剖面含水率变差系数距畦首 2 m 处最小, 80 m 处最大, 60 m 处次之。这是因为距畦首 2 m 处虽然有第 1 个灌水周期形成的致密层, 但由于受水时间最大, 剖面含水率最均匀, 标准差最小, 均值最大, 因此变差系数最小; 80 m 处无水通过, 剖面含水率上下差异较大, 变差系数在沿畦长方向各点中为最大值; 因为水流推进最大流程为 62 m, 虽然停水之后冲长达到 78 m, 但停水后 60 m 处的表层水分很快落干, 主根区(0 ~ 40 cm)土壤含水率均超过田间持水量, 但 40 ~ 100 cm 土壤含水率仍处于较低水平, 整个剖面含水率差别较大, 虽然标准差和 80 m

处相近,但由于其含水率均值高于后者,因此变差系数仅次于80 m取样点。

从畦首到畦尾的含水率分布均匀程度对作物的正常生长是非常重要的,分析各畦田的含水率均匀性,对每条畦田的5个取样点分别计算0~100 cm平均含水率,所得到的5个值作为样本,分别求其平均值和标准差,并根据所得的结果计算变差系数,计算结果如表6所示。

表6 连续灌和波涌灌灌水均匀度分析  
Tab.6 Uniformity of continuous irrigation and surge flow irrigation

处理	平均含水率	标准差	变差系数
E6C	0.221 6	0.052 7	0.238 0
E7S	0.213 5	0.034 0	0.159 4
E19S	0.229 2	0.018 6	0.081 1
E12S	0.209 7	0.031 0	0.147 7

由表6的结果可以看出,连续灌和波涌灌拔节水后畦首至畦尾的0~100 cm平均含水率大小排序结果为:E19S、E6C、E7S、E12S,经分析原因主要分以下4个方面:①土地不够平整,每条畦田的5个取样点存在空间变异性,局部微地形不完全相同因此导致含水率差异。②每条畦田宽度略有不同,在同样灌水量情况下,当水流推进到相同位置时,湿润的土壤体积不同,因此含水率也有差别。③灌水过程中可能存在深层渗漏的问题,水分有可能渗漏到100 cm以下土层中,在计算含水率时并未将这部分水分考虑在内。④灌水时偶尔有跑水问题,也是造成含水率差别的原因之一。

仅从平均含水率大小比较灌水效果是片面的,还要分析水分在田面的分布状况是否均匀,从表6可看出,连续灌E6C的变差系数最大,达0.238 0,这是因为连续灌灌水后过水田面占整个畦田方向的75.79%,其余田面处于未灌状态,是造成连续灌灌溉后水分在畦田上分布不均匀的根本原因。

E19S的含水率变差系数最小,仅为0.081 1,该处理的水流推进距离已基本达到畦尾,因此水分在畦田上的分布最均匀。E7S和E12S的变差系数介于连续灌和E19S之间,对变差系数的比较结果说明波涌灌的灌水均匀度均高于连续灌。通过对抽穗水和灌浆水后的土壤含水率分布状况分析也可以得出类似的结论。

## 2.2 微咸水波涌灌土壤全盐分布特征

图1显示了3次灌溉微咸水后,波涌灌(E19S)与连续灌(E6C)沿畦长方向各点每次灌水前后土壤主根区平均含盐量的空间变化特征。

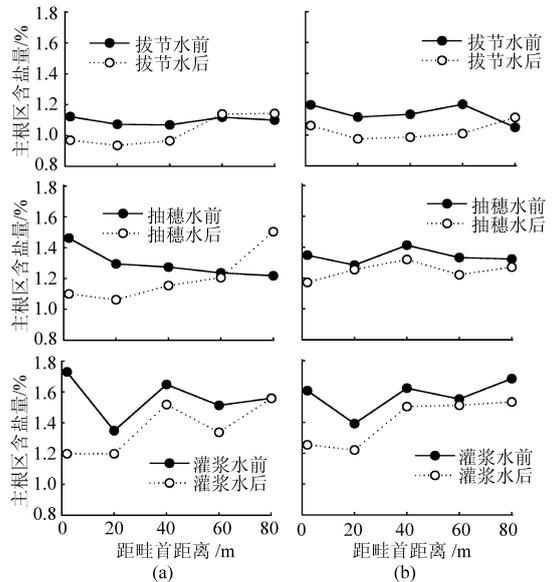


图1 微咸水波涌畦灌灌水前后土壤耕层含盐量分布特征

Fig.1 Soil salt content distribution of taproot region before and after saline water surge flow irrigation

(a) E6C (b) E19S

由图1可知,拔节水前土壤主根区平均含盐量沿畦长方向差别不大,盐分在整个畦田方向呈较为均匀的分布特征,主根区最大含盐量与最小含盐量差别为12.44%;从拔节水开始,连续灌E6C的处理由于入渗后水分对主根区(0~40 cm)土壤盐分的淋洗作用,沿畦长0~40 m范围内的含盐量有一定程度的降低,尤其是畦首部位由于入渗水量最大,脱盐率达到13.67%,对主根区土体起到了明显淡化作用,距离畦首20 m和40 m处主根区土壤含盐量也有所降低,脱盐率分别达到12.78%和9.64%,脱盐效果比畦首略差;但在大于40 m的畦田上,60 m和80 m处主根区含盐量增加幅度分别为1.88%和3.82%,主要原因是连续灌的水流推进距离有限,因此更加没有足够的水分对主根区的盐分进行淋洗,导致积盐,但由于微咸水的入渗水量较小,因此对土壤和作物影响较小。拔节期进行波涌灌的处理E19S灌水后的脱盐效果较好,除了畦尾处以外,其他各点的含盐量均有脱盐现象,达到11.31%~15.89%,对于整个畦田的压盐作用非常明显。畦尾由于拔节期设定的单宽流量较小,导致畦尾主根区土壤有积盐现象。

抽穗期灌前由于气温升高,导致主根区以外的盐分随水分上行被带入主根区,为了增大水流推进距离,在抽穗水时将单宽流量由1.75 L/(s·m)增加到1.96 L/(s·m),连续灌的水流推进末端可以达到70 m左右,波涌灌则可以达到90 m以上。连续灌畦首的脱盐率达到24.74%,沿畦田方向脱盐率呈下降趋势,到60 m处的脱盐率降低到2.56%,说明

连续灌在相同的灌水时间内流过畦田末端的水量比波涌灌少,因此畦田后段对盐分的淋洗效果不明显,80 m 处的积盐现象比拔节期更为严重,达到23.45%,造成畦田末端的冬小麦遭受水盐联合胁迫,呈现明显的植株矮小、叶面积较小、发黄和早衰现象。波涌灌冲长可以达到畦尾,主根区灌后含盐量在畦首降低幅度最大,达13.09%,20~80 m 脱盐率为2.34%~8.37%,说明水分在整个畦田上的分布较为均匀,主根区得到了有效淡化。

灌浆期由于气温的升高和干旱少雨及风速较大,盐分表聚现象最为强烈。由图1可以看出,连续灌主根区土壤含盐量较抽穗期增大了120.17%,最高含盐量仍然在畦首,由于前2个生育阶段的灌水形成了良好的边界条件,灌浆期灌溉时水流推进最大灌长达80 m,随着距畦首长度的增加,脱盐率逐渐降低,该阶段的畦尾冬小麦因拔节期和抽穗期的水盐胁迫已枯死或者无产量。波涌灌灌浆期灌前含盐量同样比抽穗期有所增加,平均含盐量增加了114.37%,灌溉后畦首降低幅度达21.89%,畦尾降低幅度为8.94%,高于畦田中部脱盐率,原因是由于畦田不平整,造成灌水后部分水分集中在畦尾部分。

麦收后进行了沿畦长方向的取土分析,仍然采用统计分析的方法对麦收后的主根区土壤含盐量沿畦长方向的离散程度进行分析,如表7所示。

表7 主根区土壤含盐量统计分析

Tab.7 Statistical analysis of taproot region soil salt content

统计指标	平均值	标准差	变差
	/g·kg <sup>-1</sup>	/g·kg <sup>-1</sup>	系数
连续灌(E6C)	185.34	18.33	0.10
波涌灌(E19S)	160.68	7.14	0.04

由表7可知,连续灌(E6C)在整个畦田上的主根区土壤含盐量比波涌灌(E19S)高约16.20%,畦首主根区含盐量麦收后达到212.59 g/kg,比波涌灌畦首高27.45%,导致这一结果的原因是连续灌畦首入渗水量最大,大量盐分随水分入渗到主根区以下,当遇高温或干旱时,大量盐分返回主根区,如果下个生长季节不进行压盐,会引发土壤的次生盐渍化。从主根区含盐量的变差系数来看,连续灌远远高于波涌灌,结合之前对水分分布的分析可知,波涌灌的水盐分布均匀性是有因果关系的,即灌水方式的改变在不增加灌水量的条件下改善了水盐分布状况,这是波涌灌优于连续灌的根本原因。

### 3 结论

(1)连续灌距离畦首越远的土壤含水率越低,40 m 以内的土壤含水率在0~60 cm 深度的分布几乎相同,都超过田间持水量,影响土壤的透气性,使作物根系生长受到抑制,而60 m 以上的田面则含水率偏低,且畦尾无水流通过,造成畦田首尾含水率极不均匀,比较连续灌和波涌灌沿畦长方向含水率的均匀度可知,波涌灌沿畦长方向的水分分布均比连续灌均匀,且供水时间为90 min 时, $N=3$ , $r=1/2$ , $T_{on}=30$  min 的波涌灌处理灌水均匀度最高。

(2)拔节水前土壤主根区平均含盐量在整个畦田方向呈较为均匀的分布状况,对麦收后的畦田土壤含盐量分析可知,微咸水的连续灌比波涌灌高16.20%,畦首积盐最为明显,波涌灌处理由于水分在畦田上分布较为均匀,有效降低了局部积盐现象的发生,波涌灌的水盐分布均匀性有一定的因果关系,由于灌水方式的改变,在不增加灌水量的条件下改善了土壤水盐分布状况,保证了土壤的可持续利用。

### 参 考 文 献

- 1 吴景社,李英能.我国21世纪农业水危机与节水农业[J].农业工程学报,1998,14(3):95~101.  
Wu Jingshe, Li Yingneng. Agricultural water crisis in the 21st century and agriculture of water-saving irrigation in China [J]. Transactions of the CSAE, 1998,14(3):95~101. (in Chinese)
- 2 张启海,周玉香.微咸水灌溉发展的基础与措施探讨[J].中国农村水利水电,1998,40(10):12~13.  
Zhang Qihai, Zhou Yuxiang. Exploratory investigation of foundation and measure about saline water irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower,1998,40(10):12~13. (in Chinese)
- 3 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002,21(4):73~77.  
Wang Quanjiu, Xu Yimin, Wang Jindong, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4):73~77. (in Chinese)
- 4 付玉娟,蔡焕杰,王健.轮灌条件下的灌溉管网优化设计[J].农业机械学报,2007,38(4):47~49.  
Fu Yujuan, Cai Huanjie, Wang Jian. Optimal design of irrigation pipe networks based on rotational irrigation method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):47~49. (in Chinese)
- 5 吴忠东,王全九,苏莹.微咸水进行农田灌溉的研究[J].人民黄河,2005,27(5):52~54.

- Wu Zhongdong, Wang Quanju, Su Ying. The study on saline water irrigation of agriculture [J]. Yellow River, 2005, 27(5):52~54. (in Chinese)
- 6 林仰南,何复光.生态农业环境质量的控制[J].农业机械学报,2001,32(2):125~126.  
Lin Yangnan, He Fuguang. Quality control of ecological agricultural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(2):125~126. (in Chinese)
- 7 Stringham G E, Keller J. Surge flow for automatic irrigation [C] // Proceedings of the 1979 ASCE Irri. and Div. Specialty Conference, 1979:132~143.
- 8 王文焰,张建丰.波涌沟灌的水流推进特性[J].西北水资源与水工程,1994,5(2):67~72.  
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng. Characteristics of water flow advancing about surge furrow irrigation[J]. Water Resources and Water Engineering of Northwest, 1994,5(2):67~72. (in Chinese)
- 9 王文焰,张建丰,汪志荣,等.波涌灌溉条件下土壤致密层的形成及其对入渗特性的影响[J].水利学报,1996,27(7):75~83.  
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong, et al. Formation of soil seal and its effect on infiltration characteristics in surge flow irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996,27(7):75~83. (in Chinese)
- 10 费良军.浑水波涌灌溉理论与技术要素试验研究[D].西安:西安理工大学,1997.  
Fei Liangjun. Experimental study on theory and technique elements of surge flow irrigation characteristics with muddy water [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 1997. (in Chinese)
- 11 吴忠东,王全九.波涌灌溉的水流推进规律研究[J].灌溉排水学报,2006,25(1):42~44.  
Wu Zhongdong, Wang Quanju. Study on the law of water flow course in surge flow irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006,25(1):42~44. (in Chinese)
- 12 刘玉林.波涌灌入渗机理的研究[J].排灌机械,2002,20(4):18~21.  
Liu Yulin. Research on permeable mechanism of surge irrigation [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2002,20(4):18~21. (in Chinese)
- 13 汪志荣,王文焰.波涌灌土壤物理性质变化[J].西北农业大学学报,1993,21(增刊):10~14.  
Wang Zhirong, Wang Wenyan. The change of soil physical characteristics under surge flow irrigation [J]. Journal of Northwestern Agricultural University, 1993, 21(supplement):10~14. (in Chinese)
- 14 尹娟,费良军,程东娟.循环率对波涌灌间歇入渗特性和地下水水质影响的研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):146~150.  
Yin Juan, Fei Liangjun, Cheng Dongjuan. Impact of cycle rate on intermittent infiltration characteristics and groundwater quality [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(4):146~150. (in Chinese)
- 15 王新元,田魁祥,邢新海,等.近滨海缺水盐渍区浅层地下水优化利用与调控模式的研究[J].农业现代化研究,1990,11(2):47~50.  
Wang Xinyuan, Tian Kuixiang, Xing Xinhai, et al. The study on the optimal utilization and regulatory mode about shallow groundwater in water deficient and saline region [J]. Research of Agricultural Modernization, 1990,11(2):47~50. (in Chinese)
- 16 赵永.作物需水量计算方法比较与非充分灌溉预报研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2004.  
Zhao Yong. Comparing different methods of calculating crop water requirement & study on limited irrigation forecasting [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2004. (in Chinese)
- 17 梁薇.冬小麦经济节水灌溉制度的研究[D].邯郸:河北工程大学,2007.  
Liang Wei. Study on economical water-saving irrigation schedule for winter wheat [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2007. (in Chinese)