

# 循环率对波涌灌间歇入渗特性和地下水水质影响的研究

尹娟<sup>1,2</sup>, 费良军<sup>1</sup>, 程东娟<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048; 2. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 710021)

**摘要:** 通过肥液(KNO<sub>3</sub> 溶液)室内入渗试验, 模拟研究了地下水水位为 150 cm 条件下, 循环率对肥液间歇入渗土壤和地下水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 运移特性的影响。结果表明, 相同净入渗时间和周期条件下, 在一定范围内循环率越小, 间歇时间越长, 土壤水分再分布越充分, 间歇入渗减渗作用越强; 与循环率为 1/2 相比, 循环率为 1/3 的平均入渗率减小不显著, 当循环率减小至 1/4 时, 减渗程度明显增大; 随循环率的减小累计入渗量减小; 循环率取值为 1/3 时, 随水分迁移进入地下水的硝态氮量最小。

**关键词:** 循环率; 波涌灌; 间歇入渗; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 运移; 地下水

**中图分类号:** S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)04-0146-05

波涌灌是按一定时间间隔周期性地将水引入到沟(畦)中的一种节水型地面灌溉技术。波涌灌田面土壤存在着吸湿和脱湿的交替过程, 使土壤结构发生变化, 表层土壤形成致密层, 导致湿润段土壤入渗能力降低和田面糙率减小。波涌灌溉较传统地面灌溉具有节水、保肥、减少深层渗漏, 提高灌水效率、改善灌水均匀度等优点, 适宜于我国旱作农田地面灌溉<sup>[1,2]</sup>。结合波涌灌溉进行施肥, 有利于减少肥料的淋失, 对于提高肥料利用率, 减轻环境污染具有重要意义。

国内外学者已对清水和含泥沙的浑水波涌灌溉间歇入渗特性进行了大量研究<sup>[3,4]</sup>, 但对于施肥条件下波涌灌溉间歇入渗特性及对地下水环境影响的研究却很少<sup>[5,6]</sup>。土壤水分运动与溶质运移关系密切, 溶质的运移依靠土壤水分的运动作为载体, 相反, 由于溶质的存在, 会对土壤水分的入渗过程产生一定影响。循环率是波涌灌溉技术要素之一, 其大小对土壤入渗特性影响较大<sup>[1,7~9]</sup>。本文通过模拟地下水水位为 150 cm 条件下灌施肥液间歇入渗试验, 研究循环率对土壤间歇入渗特性及地下水水质的影响, 为提高波涌灌水分和溶质有效利用率奠定科学基础。

## 1 材料与方 法

试验在西安理工大学陕西省水资源与环境重点实验室进行。为了研究灌施土壤间歇入渗特性, 利

用一维垂直入渗装置在室内进行土壤间歇入渗试验。试验装置主要由土柱和供水系统两部分组成, 供水系统由地下水供水系统和下渗供水系统组成。

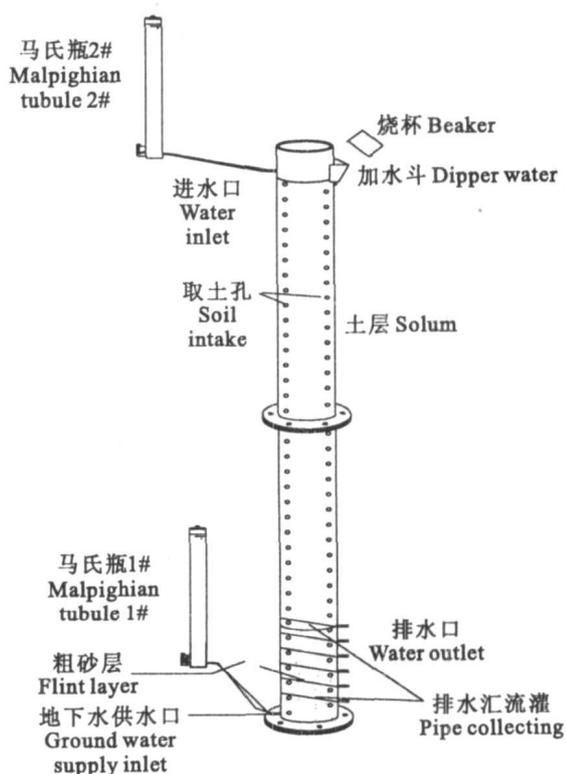


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental equipment

如图 1 所示, 供水系统利用改进的马氏瓶进行

收稿日期: 2006-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179030); 陕西重点实验室重点科研项目(03JS041)

作者简介: 尹娟(1971-), 女, 宁夏同心县人, 副教授, 博士研究生, 从事节水灌溉与水资源利用研究。

自动供水,马氏瓶置于可调节高度的活动支架上。土柱为高 190 cm、内径 15 cm 的有机玻璃土柱,其底部 35 cm 深度内装粒径为 2~7 mm 的砂砾石,模拟地下饱和含水层,上部 150 cm 为非饱和均质土壤,两部分间垫以弹性较差的薄海绵,以免上层土壤进入砂砾层。土柱沿垂向设取土孔 4 排,孔径为 2.0 cm,孔中心间距为 5.0 cm,相邻两排取土孔以垂直孔距 2.5 cm 交叉布置,以避免所取土样间距过大,降低漏测含水量与氮素含量峰值的可能性。为了减小间歇入渗各周期加水 and 取水过程中表层土壤致密层的破坏,在入渗前先保持一定厚度的水层。为此,在土柱上部开 0.3 cm 高、宽 4.0 cm 的进(排)水缝,外侧设有供水槽,在供水阶段初期通过供水槽加水,在水槽底部安装排水管嘴,以便排放周期供水结束后土柱上部积水。试验采用 KNO<sub>3</sub> 作为肥料。

试验土样为粉壤土,其颗粒级配组成见表 1。

表 1 试验土壤颗粒级配组成

Table 1 Particle composition of the soil samples

粒 径 Soil particle diameter(mm)	<1.0	<0.5	<0.25	<0.1	<0.05	<0.025	<0.01	<0.005	<0.002	<0.001
含量 Content (%)	99.60	99.20	98.87	98.60	89.15	56.58	28.02	11.34	2.88	0.90

## 2 结果与分析

### 2.1 循环率对间歇入渗土壤水分运移规律的影响

波涌灌肥液间歇入渗净入渗时间相同,不同循环率的间歇入渗各周期入渗时间与累计入渗量的关系见图 2。可以看出,不同循环率的肥液间歇入渗,第一周期入渗量与入渗时间的关系曲线基本相同,从第二周期开始,不同循环率的曲线高度不同,循环率为 1/2 的曲线最高,表明相同入渗时间内,其入渗水量最大,试验中其累积入渗量为 52.89 mm;循环率为 1/3 的曲线低于循环率为 1/2 的曲线,累积入渗水量为 48.44 mm,较循环率为 1/2 的累积入渗量减少了 8.42%;循环率为 1/4 的入渗水量最小,为 43.07 mm,较循环率为 1/2 的累积入渗量减少了 18.58%。说明间歇入渗在相同净入渗时间和周期

试验土样经风干、粉碎、过筛(筛孔径为 2 mm)、配水,按土壤容重 1.30 g/cm<sup>3</sup> 分层(5 cm)装土。试验一开始先由马氏瓶供给地下水,地下水位高度通过马氏瓶进气孔来控制,待土柱中上升毛管水、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分布稳定后再进行入渗试验。在进行入渗试验时,按照先密后疏的时间间隔通过马氏瓶读取累积入渗量,并记录相应的时间;在间歇入渗各周期供水阶段末、间歇阶段末以及停水后再分布 24 h、72 h、120 h,利用土钻取土,烘干,以 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液为浸提液,土水比 1:10 浸提,经过滤,活性炭吸附等处理制成供测液。土壤水分采用烘干法测定,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度采用 DR/4000 型(美国 HACH 公司生产)紫外分光光度计测定。

试验采用溶液浓度为 500 mg/L-N-KNO<sub>3</sub>,入渗净历时为 90 min,周期数为 3,周期供水时间为 30 min,循环率分别取为 1/2、1/3、1/4,共设三个处理。

数条件下,在一定范围内循环率越小,间歇入渗渗透作用越强。不同循环率的间歇入渗各周期土壤平均入渗率见表 2。

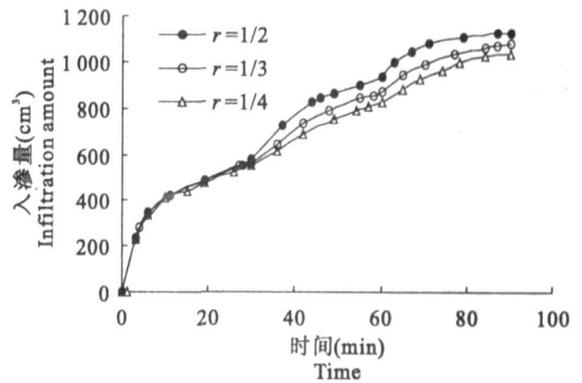


图 2 不同循环率的间歇入渗水量与入渗时间的关系  
Fig.2 Curve of intermittent infiltration amount and time

表 2 不同循环率间歇入渗周期平均入渗率

Table 2 The average infiltration rate of cycle for intermittent infiltration

周期数 Cycle number	平均入渗率 <i>I</i> The average infiltration rate (cm <sup>3</sup> /min)			<i>r</i> =1/3 减少率(%)Decrease	<i>r</i> =1/4 减少率(%)Decrease
	<i>r</i> =1/2	<i>r</i> =1/3	<i>r</i> =1/4		
<i>n</i> =1	21.8	18.73	16	14.08	26.61
<i>n</i> =2	9.9	9.73	8	1.72	19.19
<i>n</i> =3	8.3	8.23	7.27	0.84	12.41

由表 2 可以看出,以循环率为 1/2 的平均入渗率为参考,第二周期循环率为 1/3 和 1/4 分别较循环率为 1/2 的减小 14.08% 和 26.61%;第二周期循环率为 1/3 和 1/4 分别较循环率为 1/2 的减小 1.72% 和 19.19%;而第三周期循环率为 1/3 和 1/4 较循环率为 1/2 的分别减小 0.84% 和 12.4%。循环率为 1/3 的平均入渗率减小不显著,当循环率减小至 1/4 时,减渗程度明显增大,此结论与图 2 所示一致。产生这一现象的主要原因是在一定范围内,循环率越小,停水时间越长,土壤水分再分布越充分,因土壤膨胀而使土壤表层致密化作用增强。

## 2.2 循环率对间歇入渗土壤 $\text{NO}_3^-$ -N 运移规律的影响

图 3 为不同循环率的间歇入渗结束时土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度分布。由图 3 可知,入渗结束时土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分布差异不太大, $\text{NO}_3^-$ -N 分布曲线峰值均在土表处,且峰值大小基本相同,平均为  $\text{N } 47.3 \text{ mg/kg}$ ;入渗  $\text{NO}_3^-$ -N 主要分布于上层土壤(0~60 cm),且随着深度的增加,土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量迅速降低,下层土壤(60~150 cm)硝态氮含量变化不大,在  $0.8 \sim 3.1 \text{ mg/kg}$  之间,略大于初始值。

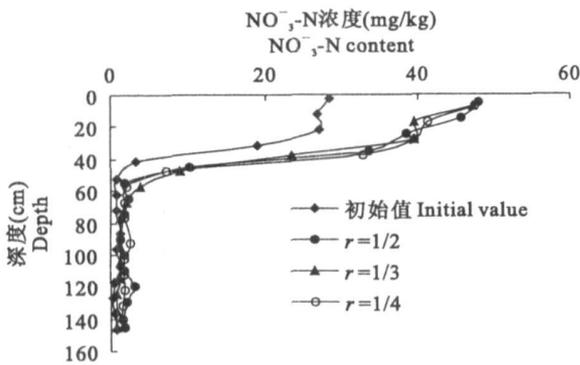


图 3 间歇入渗结束时土壤中硝态氮分布

Fig. 3  $\text{NO}_3^-$ -N content distribution in soil with intermittent infiltration

$\text{NO}_3^-$ -N 带负电荷,不易被土壤颗粒吸附,主要通过对流作用随土壤水分运动。入渗试验是在地下水达到稳定之后进行的,因此入渗前土壤含水量较高,而且在 0~40 cm 深度的土层中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度较大。入渗开始时,溶液进入表层土壤,并迅速被土壤中的水分稀释,随着入渗时间的延长,表层土壤水分逐渐被入渗溶液置换,土壤溶液浓度接近或等于入渗溶液浓度;同时由于土壤含水率高而导水率大,入渗溶液向下推进速度很快,并不断被湿润锋处的土壤水分稀释,这时即使水分运移至下层土壤或

接近地下水,但下层土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度并不高,随水运移而直接进入地下水的更少。例如,试验过程中观测到地下排水出流初期, $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度变化很小,即为原土壤中本身所含有的  $\text{NO}_3^-$ -N,试验初期排出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在  $0.11 \sim 0.32 \text{ mg/L}$ 。

间歇入渗再分布 5 天的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分布曲线见图 4。再分布 5 天后土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量分布曲线峰值减小至  $47.07 \text{ mg/kg}$  左右, $\text{NO}_3^-$ -N 主要存在于 1~60 cm 土层范围内,原因是进入再分布阶段后, $\text{NO}_3^-$ -N 运移速度随水分运动速度而迅速减缓,并且扩散作用所占比重逐渐增加;再分布过程中肥液入渗土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度锋运移距离随时间而继续增大,上层土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 相应减少,下层土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度不断增加,整个湿润土体内  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的分布相对均匀。土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度最大值逐渐减小,且其位置随时间向下迁移。从图 4 中还可看出,下层土壤 60~150 cm 范围内  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度很低(小于  $5 \text{ mg/kg}$ ),这是由于试验累计入渗量较大,入渗溶液浓度较高,入渗及再分布过程中  $\text{NO}_3^-$ -N 随水分运动迁移进入下层土壤,最终进入地下水;另外,灌水后使得土壤 60~150 cm 范围内含水量显著增大,通气状况差而处于厌氧状态,供试土壤为弱碱性(pH 等于 7.35),在反硝化细菌作用下土壤易于发生反硝化反应。有报道<sup>[10]</sup>反硝化速率随土壤含水量的增加而增加。试验结果与此结论一致。

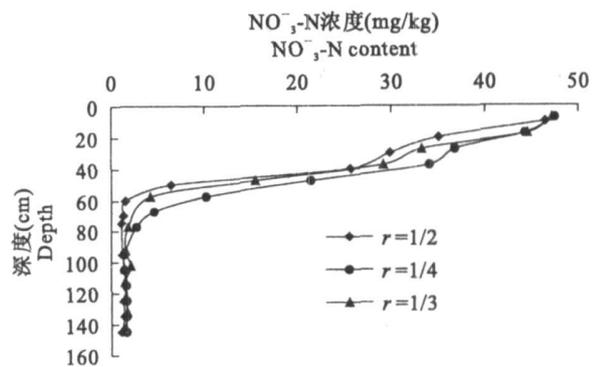


图 4 再分布 5 天土壤中硝态氮浓度

Fig. 4  $\text{NO}_3^-$ -N content distribution after 5 d redistribution

## 2.3 循环率对地下水中 $\text{NO}_3^-$ -N 分布规律的影响

当供水停止后,进入再分布过程。随着时间的延续,土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 继续向下运移,上层土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 相应减少,湿润峰向下迁移距离逐渐增大,下层土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度不断增加,整个湿

润土体内  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的分布相对更加均匀。而经过较长时间的再分布过程,如在停水后5天时观测发现,整个土柱内土壤的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量整体都有所增加。同时,随着土壤入渗水分运移和湿润锋的向下推进,部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  随水分迁移进入地下水层中,使地下水位上升。试验中取样距离分别为地下水位以下的5, 10, 15, 20, 25, 30 cm处。

由于地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度受很多因素影响,在灌水之前其初始浓度各不相同。因此,只能通过计算不同循环率对应的再分布1天和再分布5天与初始浓度比较的增长率,分析循环率对地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的影响。土壤溶液中溶质的迁移速度一般比水分的运移速度小<sup>[11]</sup>,为便于分析,近似将溶质迁移速度和水分运移速度视为同步。

由表3可知:循环率为1/2时,再分布1天、再分布5天地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度与初始值相比增大27.08%和35.42%;循环率为1/3时,再分布1天、再分布5天地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度与初始值相比增大13.12%和23.53%;循环率为1/4时,再分布1天、再分布5天地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度与初始值相比增大44.77%和57.74%。在相同条件下,地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度增大的百分数越大,说明进入地下水中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  越多,对地下水水质的污染程度越大。循环率的选取对致密层的形成及发育、间歇入渗特性和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  对地下水的污染程度具有较大的影响。试验条件下波涌灌循环率取1/3,效果较好。

表3 地下水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度变化分析  
Table 3 Groundwater  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentration change

循环率 Cycle rate	项目 Item	初始浓度 The concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ at begining	再分布1天浓度 The concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ redistributed 1 d	再分布5天浓度 The concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ redistributed 5 d
$r=1/2$	平均值(mg/L) The average date	0.19	0.24	0.26
	与初始值相比较变化率(%) The rate of change		27.08	35.42
$r=1/3$	平均值(mg/L) The average date	0.34	0.39	0.42
	与初始值相比较变化率(%) The rate of change		13.12	23.53
$r=1/4$	平均值(mg/L) The average date	0.48	0.69	0.75
	与初始值相比较变化率(%) The rate of change		44.77	57.74

### 3 结论

1) 相同净入渗时间和周期数条件下,在一定范围内循环率越小,停水时间越长,土壤水分再分布越充分,土壤表层致密化作用越强,间歇入渗减渗作用越强;与循环率为1/2相比,循环率为1/3的平均入渗率减小不显著,当循环率减小至1/4时,减渗程度明显增大。

2) 试验中在净入渗时间和周期数相同的条件下,循环率分别取为1/2、1/3、1/4,累计入渗量随循环率的减小而减小。

3) 在室内模拟波涌灌间歇入渗肥液的试验中,循环率取值为1/3时,随灌溉进入地下水中硝态氮的量最小。

### 参考文献:

- [1] 王文焰.波涌灌溉试验研究与应用[M].西安:西北工业大学出版社,1994.
- [2] 刘群昌,许迪,谢崇宝,等.波涌灌溉技术田间适应性分析[J].农业工程学报,2002,18(1):35-40.
- [3] 彭文英,张科利,李双才.黄土高原退耕还林(草)紧迫性地域分级论证[J].自然资源学报,2002,17(4):438-443.
- [4] 田均良,梁一民,刘普灵.黄土高原丘陵区中尺度生态农业建设探索[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [5] 琚彤军,刘普灵.燕沟流域水保治理措施优化配置示范研究[J].水土保持学报,2001,15(5):53-55.
- [6] 焦峰,杨勤科,雷惠珠.燕儿沟流域土地利用现状及合理利用途径[J].水土保持通报,1998,18(7):41-44.
- [7] 王文焰,汪志荣,费良军,等.波涌灌溉的灌水质量评价及计算[J].水利学报,2000,(3):53-58.
- [8] 费良军,王云涛.波涌畦灌灌水技术要素的优化组合研究[J].水利学报,1996,(12):16-22.

- [9] 费良军, 王云涛, 杨宏德. 涌流畦灌技术要素试验及其设计方法研究[J]. 灌溉排水, 1993, 12(3): 11-15.
- [10] 范小辉, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. 土壤通

报, 2002, 33(5): 385-391.

- [11] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

## Impact of cycle rate on intermittent infiltration characteristics and groundwater quality

YIN Juan<sup>1,2</sup>, FEI Liang-jun<sup>1</sup>, CHENG Dong-juan<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. College of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** In the experiments of fertile solution infiltration, the main effects of cycle rate on the infiltrated water and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  transfer and distribution with a 70 cm groundwater table are shown as follows: (1) To some extent, infiltration rate decrease with a decreased cycle rate; In this experiment, the optimal cycle rate is 1/4, which leads to a shallower distribution of the moisture and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in soil and weakens the trend of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  leaching; (2) The concentration of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in the groundwater is least when the cycle rate is 1/3.

**Key words:** cycle rate; surge flow irrigation; intermittent infiltration; nitrate transport; groundwater

(上接第 145 页)

## Integration of water-saving agricultural technology and its application in well-irrigated region in North China

QIN Chao<sup>1</sup>, HU Chun-sheng<sup>2</sup>

(1. Shanxi Provincial Station of Agricultural Technology Extension, Taiyuan, Shanxi 30002, China;

2. The Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

**Abstract:** Based on many year field experiment results of water-saving agricultural technology, we integrated seven water-saving models, the model three and model four were built up by some agronomic water-saving technologies, such as insufficient irrigation method, straw mulching, shallow tillage and so on. The WUE (water use efficiency) of model three and model four improved 12%~21.3% comparing with CK model. Model three and model four could be applied in all irrigation regions using groundwater in North China.

**Key words:** water-saving agriculture; water-saving irrigation; irrigation region using groundwater; North China