

尿素肥液间歇入渗土壤水氮运移特性试验研究

费良军,谭金兰,韩鑫,吴军虎

(西安理工大学水资源研究所,陕西 西安 710048)

摘要:通过连续和间歇一维垂直入渗试验,研究了波涌灌溉施尿素下铵态氮和硝态氮在土壤和地下水中的迁移转化特性,表明波涌灌溉间歇入渗较连续入渗有保肥和减小地下水污染等优点,可以有效缓解农业施肥带来的地下水环境污染。该研究成果为进一步研究波涌灌溉水氮运移特性和波涌灌溉对地下水环境的影响奠定基础。

关键词:波涌灌溉;间歇入渗;尿素;水氮运移

中图分类号: S275.8;S143.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0245-06

Experimental investigation on water and nitrogen transforming characteristics under intermittent infiltration of urea solution

FEI Liang-jun, TAN Jin-lan, HAN Xin, WU Jun-hu

(Institute of Water Resources Research, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The transforming characteristics of NH_4^+ and NO_3^- in soil and groundwater were analyzed through continuous and intermittent one-dimensional vertical infiltration test under surge fertigation with urea. The results showed that intermittent infiltration was superior to continuous infiltration in retaining fertilizer and it could relieve the pollution of groundwater caused by agricultural fertilization. The research results laid foundation for further study of the transforming characteristics of water and urea and the environmental effects of groundwater under surge irrigation.

Keywords: surge irrigation; intermittent infiltration; transformation of water and nitrogen; urea

迫于资源短缺和环境污染压力,水肥的高效无污染利用无疑成为世界农业所面临的重要任务之一^[1]。相比于目前我国大量采用的传统地面灌溉,波涌灌具有节水、保肥、灌水质量高、有利于小定额灌溉等优点,适合我国旱作农田地面灌溉应用^[2]。结合我国目前农业灌溉水平及其发展需要,研究波涌灌溉施尿素在土壤中的迁移转化特性,对提高灌溉水利用率,改善施肥均匀度,减少氮肥用量,降低土壤环境及地下水污染有着重要的科学价值和生产实际意义。

波涌灌溉条件下的土壤水分入渗过程属于间歇入渗,国内外学者已对波涌灌及其间歇入渗特性进行了大量的研究,其研究内容主要集中在土壤水分入渗特性、灌水效率、节水原理和地表水流运动特性等方面。近几年国外关于波涌灌研究未见报道,国内展开了波涌灌间歇入渗施肥条件下水分和养分的

运移规律及施肥引起的地下水环境污染问题的研究工作,目前仍处于初步探索阶段^[3-8]。水分与养分在土壤和地下水中的运移分布是一个相互耦合的过程,本研究通过连续入渗和间歇入渗试验,以农业生产上大量采用的尿素为肥液,分析间歇入渗施肥条件下水分、养分在土壤中及地下水中运移分布规律,并进一步分析了水分、养分在土壤中的运移分布对其在地下水中运移分布的影响。

1 试验设备和方法

试验在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点试验室进行,模拟了地下水埋深为 150 cm 的土柱一维垂直入渗过程。

1.1 试验设备

如图 1 所示:试验装置由三部分组成:(1)土柱,(2)地下水控制系统,(3)入渗供水系统。

收稿日期:2013-03-26

基金项目:国家自然科学基金(51079121)

作者简介:费良军(1963—),男,陕西蓝田人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉和农业水资源利用研究。E-mail: feiliangjun@sohu.com。

通信作者:谭金兰(1988—),女,硕士,主要从事节水灌溉研究。E-mail: lanlan1988.love@163.com。

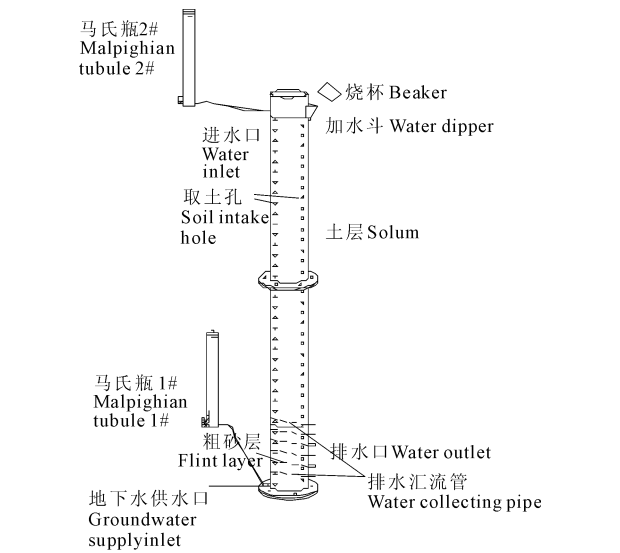


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

土柱管为有机玻璃,总高 2.2 m,内径 21.4 cm。底部 60 cm 的深度模拟地下饱和含水层,内装粒径为 3~7 mm 的砂砾石;上部 150 cm 的深度模拟非饱和土壤层,内装 2 mm 以下的均质土壤;两部分中间隔有滤纸,防止上层土壤进入底部含水层。取土孔

分四列,沿土柱垂向布设,其孔径 2.0 cm;同列相邻取土孔的中心距离为 5 cm,而将相邻两列的相邻取土孔间垂直距离设置为 2.5 cm。土柱顶部设加水槽,在供水初期先向加水槽中供水,防止水流冲击、破坏表层土壤的致密层,同时在间歇停水期起到及时排空土柱表面的积水的作用。地下水控制系统:由改进的马氏瓶(1# 马氏瓶)与土柱底部供水口连接组成。入渗供水系统:由马氏瓶(2# 马氏瓶)与土柱上部供水口连接组成,通过固定马氏瓶进气孔的高度达到定水头供水的目的。

试验中采用铜制汇流管收集水样。汇流管内径 8.0 mm;汇流管管壁设汇水孔,孔径 2.0 mm,孔间距 1.0 cm。

1.2 试验土壤和溶液

试验土壤采用西安粉土,土壤颗粒组成使用马尔文激光粒度仪测定,按照卡钦斯基制进行分类,颗粒组成如表 1 所示,其基本理化性质见表 2。土样经过风干、碾压、过筛、配水得到装土所需的土样;装土时按容重 1.35 g·cm⁻³、每 5 cm 分层填装,试验全过程用水均为蒸馏水,灌施溶液是浓度为 500 g·L⁻¹ 的尿素溶液。

表 1 试验土壤颗粒级配组成

Table 1 Grain composition of experimental soil

粒径/mm Particle size	< 1.0	< 0.5	< 0.25	< 0.1	< 0.05	< 0.025	< 0.01	< 0.005	< 0.002	< 0.001
含量 Content/%	100	99.71	98.22	88.99	64.32	35.05	15.1	9.214	4.30	2.23

表 2 试验土样基本参数

Table 2 The basic parameters of experimental soil

土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /(cm·min ⁻¹)	初始含水率 Initial water content /%	饱和含水量 Saturated water content /%	pH	初始硝态氮含量 Initial NO ₃ ⁻ - N concentration /(mg·kg ⁻¹)	初始铵态氮含量 Initial NH ₄ ⁺ - N concentration /(mg·kg ⁻¹)
1.35	0.0129	10.76	33.67	7.5	37.59	17

注:文中所指含水率均为土壤质量含水率。 Note: Water content in this paper means mass water content.

1.3 试验处理

本试验设两个处理,分别为连续垂直入渗和间歇垂直入渗,其中间歇垂直入渗是波涌灌条件下的间歇入渗。灌水定额均为 45 mm;其中,间歇入渗的周期数为 3,周期间歇时间为 30 min。入渗量通过马氏瓶刻度读取;湿润锋采用直尺测量;土壤含水量采用烘干法测定,本文含水率采用重量含水率;土壤硝态氮和铵态氮含量测定时先使用 CaCl₂ 溶液浸提土壤制得无色透明浸提液,再采用德国生产的 CleverChem 200 型全自动间断化学分析仪测定硝态氮和

铵态氮含量。由 1 号马氏瓶供给地下水,待上升毛管水分布稳定之后,则进行入渗试验。

2 成果分析

2.1 水分在土壤中运移分布特性

图 2、图 3 分别表示连续入渗条件和间歇入渗条件下土壤含水量的再分布。

由图 2、图 3 知,入渗结束时,连续入渗的湿润锋是 98.7 cm,间歇入渗的湿润锋是 86.5 cm(土壤中初始值含水率分布曲线与入渗结束后含水率分布曲线交点的纵坐标值为入渗结束后入渗湿润峰),表明

间歇入渗条件下湿润锋的推移速度较连续入渗的慢;图 2 表明,土层深度 0~100 cm 深度范围内连续入渗条件下再分布 1 d 时土壤含水率与入渗结束时相比有较大的变化,入渗结束时土层平均含水率是 27.82%,再分布 1 d 时是 23.62%,平均含水率降低值为 4.2%;而再分布 5 d、10 d 与 20 d 时,土壤层含水量几乎没有变化,与再分布 1 d 相比土层平均含水率减小值分别是 0.55%、0.9%、0.9%。相比连续入渗,间歇入渗下的土壤水再分布更均匀,土层平均含水率再分布 5 d、10 d 与 20 d 时变化显著;土层深度 0~90 cm 深度范围内,间歇入渗下再分布 1 d 时土壤平均含水率比入渗结束时减少为 13.14%,再分布 5 d、10 d、20 d 与再分布 1 d 相比,土层平均含水率减小值分别是 2.57%、3.92%、5.36%。表明,间歇入渗相比连续入渗土壤水分分布的均匀性不仅体现在水分入渗的过程中^[5],也体现在入渗结束后的土壤水再分布的过程中。其主要原因是土壤水在间歇入渗停水期进行再分布,土壤水的再分布会引起土壤水水势梯度下降,使土壤水分布更均匀。由于水分的运移是影响溶质运移的主要且关键因素,因此间歇入渗对水分入渗及再分布的影响将无疑影响到溶质的迁移。

2.2 NH₄⁺ 在土壤中的迁移分布特性

图 4 表示间歇入渗下土壤中 NH₄⁺ 浓度的再分布,图 5 为连续与间歇入渗下土壤中 NH₄⁺ 浓度的再分布对比图。

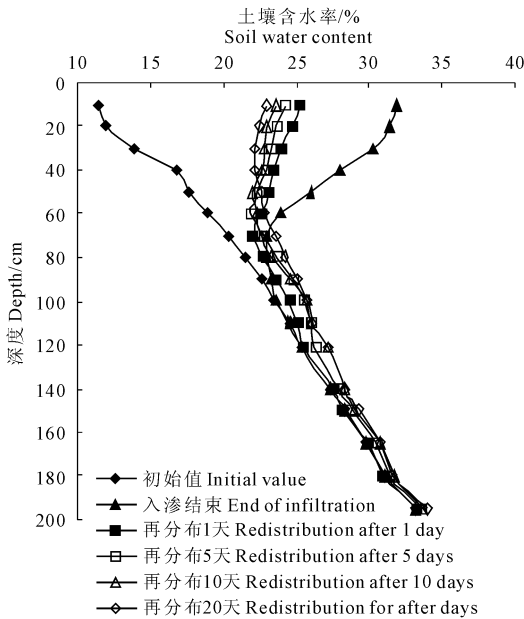


图 2 连续入渗土壤含水量再分布

Fig.2 Redistribution of soil water content under continuous infiltration

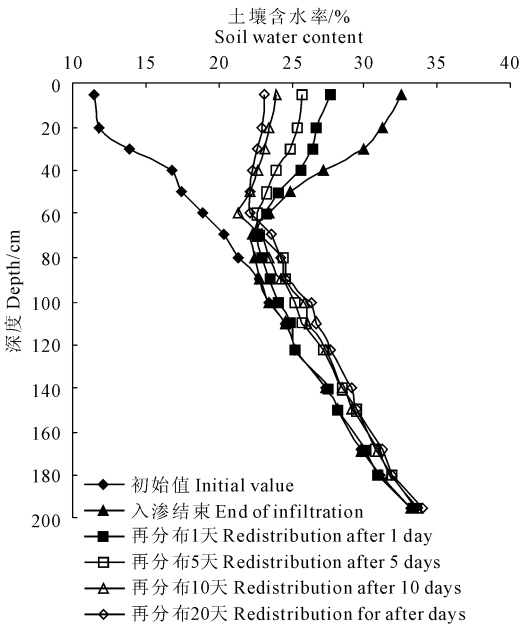


图 3 间歇入渗土壤含水量再分布

Fig.3 Redistribution of soil water content under intermittent infiltration

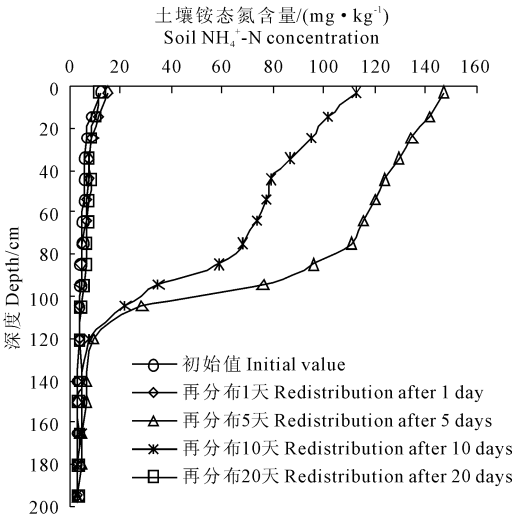


图 4 间歇入渗 NH₄⁺ 浓度的再分布

Fig.4 Redistribution of NH₄⁺ concentration under intermittent infiltration

图 5 表明,间歇与连续入渗条件下 NH₄⁺ 的分布规律基本一致。从图 4 看出,空间上,NH₄⁺ 含量与土层深度负相关,从地表到土壤底层 NH₄⁺ 含量依次递减,NH₄⁺ 主要集中在 0~102.5 cm 深度土壤中,土层 102.5~200 cm 内 NH₄⁺ 含量很低;时间上,土壤 NH₄⁺ 含量随时间呈现低-高-低的变化,再分布 5 d 时土壤 NH₄⁺ 浓度变化最大。下面以 0~102.5 cm 土层深度的土壤 NH₄⁺ 浓度数据说明 NH₄⁺ 在时间上的变化。再分布 1 d 和再分布 20 d

时, NH_4^+ 平均浓度较初始浓度的增量很小, 分别是 $0.22/2.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 几乎没有变化; 再分布 5 d 时, NH_4^+ 的浓度上升到最大值, NH_4^+ 平均浓度较初始浓度的增量达到 $93.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 再分布 10 d 时其浓度较再分布 5 d 时已明显降低, NH_4^+ 平均浓度较初始浓度的增量为 $60.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较再分布 5 d 时 NH_4^+ 的平均浓度降低了 $32.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NH_4^+ 随时间呈现低 - 高 - 低的变化现象是尿素在土壤中反应过程的体现, 是尿素水解和硝化作用的共同作用。入渗结束时尿素刚施入土壤, 土壤中 NH_4^+ 含量很低, 再分布期尿素逐步水解引起土壤中 NH_4^+ 含量快速上升, 同时在硝化作用下 NH_4^+ 转变为 NO_3^- , 造成土壤中 NH_4^+ 含量的下降, 因此 NH_4^+ 含量在整个土层表现出低 - 高 - 低的变化现象。

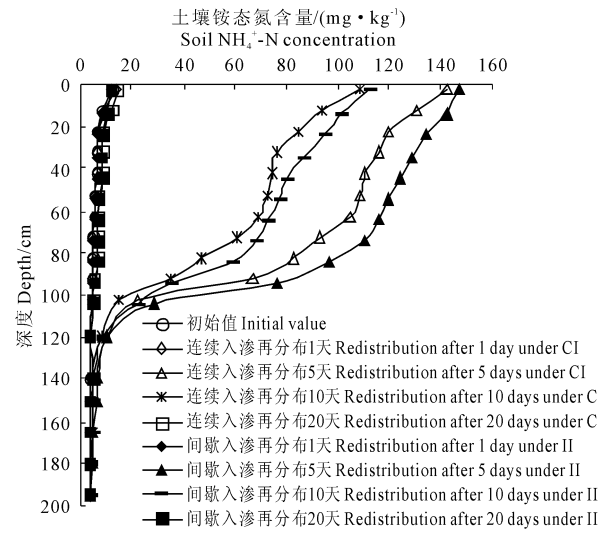


图 5 连续与间歇入渗下 NH_4^+ 浓度的再分布
Fig.5 Redistribution of NH_4^+ concentration under continuous infiltration and intermittent infiltration

从图 5 看出, $0 \sim 102.5 \text{ cm}$ 土层深度范围内, 再分布 5 d 与再分布 10 d 时 NH_4^+ 平均浓度间歇入渗分别大于连续入渗 $11.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $6.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明 $0 \sim 102.5 \text{ cm}$ 深度土层内间歇入渗比连续入渗 NH_4^+ 含量大, 即间歇入渗能保存更多的 NH_4^+ 在浅层土壤中, 起到保肥的作用, 其主要原因是间歇入渗较连续入渗有保水作用, 更多的土壤水保存在浅层土壤里。 $102.5 \sim 200 \text{ cm}$ 土层深度范围内间歇入渗和连续入渗 NH_4^+ 浓度都很低, 间歇入渗较连续入渗 NH_4^+ 浓度更低, 连续入渗下 NH_4^+ 浓度在 $3.4 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内变动, 间歇入渗下 NH_4^+ 浓度在 $3.4 \sim 9.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内变动。

综上, 间歇入渗下土壤中 NH_4^+ 含量表现出一一般入渗的规律, NH_4^+ 含量与土层深度呈负相关, 土壤 NH_4^+ 含量随时间呈现低 - 高 - 低的变化; 间歇入渗较连续入渗能保存更多的 NH_4^+ 在 $0 \sim 102.5 \text{ cm}$ 土层内, 起到保肥减少深层渗漏的作用。

2.3 NO_3^- 在土壤中的迁移分布特性

图 6 表示间歇入渗土壤中 NO_3^- 浓度的再分布, 图 7 表示连续与间歇入渗下 NO_3^- 浓度再分布 1 d 时的对比, 图 8 表示连续与间歇入渗下 NO_3^- 浓度的再分布对比。

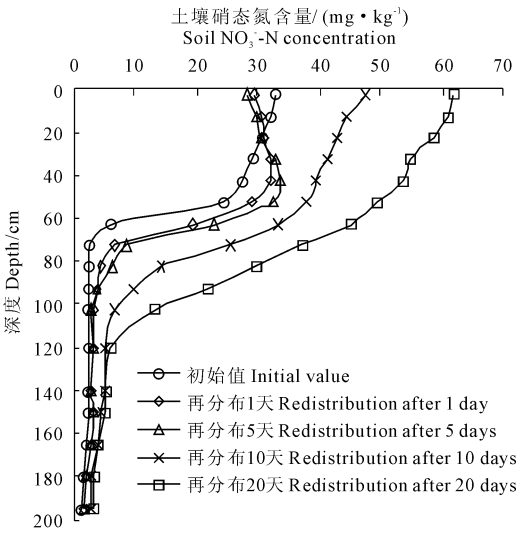


图 6 间歇入渗 NO_3^- 浓度的再分布
Fig.6 Redistribution of NO_3^- concentration under intermittent infiltration

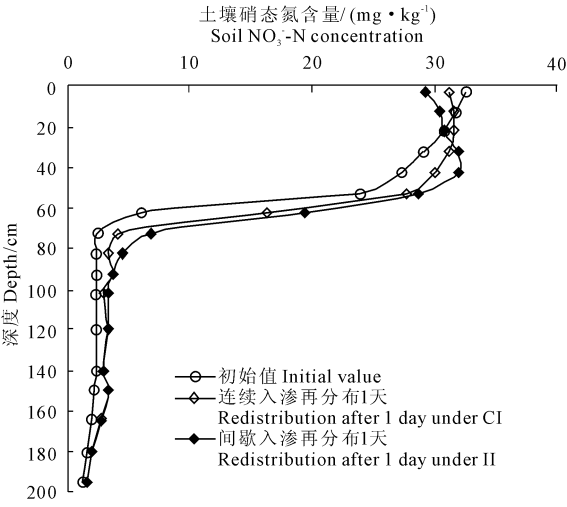


图 7 再分布 1 d 时 NO_3^- 浓度的再分布
Fig.7 Redistribution of NO_3^- concentration after 1 day under continuous infiltration and intermittent infiltration

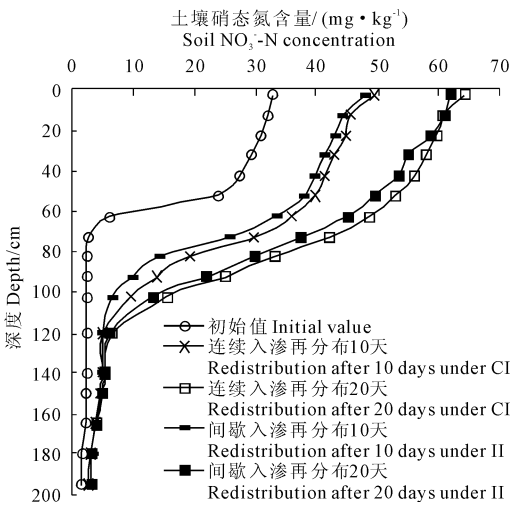


图 8 再分布 10 d、20 d 时 NO_3^- 浓度的再分布

Fig.8 Redistribution of NO_3^- concentration after 10 days and 20 days under continuous infiltration and intermittent infiltration

图 7 显示,再分布 1 天时,间歇入渗表层 0~25 cm 土壤中 NO_3^- 的浓度较连续入渗的小 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,再分布 1 d 时尿素刚开始水解为 NH_4^+ ,硝化作用产生的 NO_3^- 几乎为零^[9],因此不可能是致密层降低硝化作用而使间歇入渗表层 0~36 cm 土壤中 NO_3^- 的浓度较连续入渗的小,原因是间歇入渗下对表层 0~25 cm 土壤中 NO_3^- 的淋洗作用比连续入渗强,出现了表层土 NO_3^- 浓度的偏低现象;在土层 36~54 cm 深度范围内,间歇入渗下 NO_3^- 浓度高于连续入渗,表明间歇入渗土层 0~25 cm 淋洗的 NO_3^- 主要累积在土层 25~54 cm 深度范围内,不会造成深层渗漏污染地下水环境。

图 8 表明,再分布 10 d 和 20 d 时 0~102.5 土壤深度范围内间歇入渗下 NO_3^- 浓度较连续入渗下 NO_3^- 的浓度低,差值分别是 $2.5、2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NO_3^- 来源于 NH_4^+ 的硝化作用、0~102.5 土壤深度范围内间歇入渗下 NH_4^+ 浓度较连续入渗下 NH_4^+ 浓度高,在同等强度硝化作用下,0~102.5 土壤深度范围内间歇入渗下 NO_3^- 浓度较连续入渗下 NO_3^- 的浓度应高,而试验结果是间歇入渗下 NO_3^- 浓度较连续入渗下 NO_3^- 的浓度低,表明间歇入渗较连续入渗的硝化作用弱,具体是延缓了硝化作用的时间还是减弱了硝化作用的强度,这有待进一步的研究。

由上面的分析可知,间歇入渗较连续入渗能有效均匀地将 NH_4^+ 保存在浅层土壤中,土层中硝化作用使间歇入渗土壤中 NO_3^- 浓度低于连续入渗,说明间歇入渗较连续入渗节水保肥,能减少氮素的深

层渗漏,缓解因灌溉引起的地下水污染问题。

2.4 NO_3^- 在地下水中迁移分布特性对比

图 9 表示间歇入渗地下水中硝态氮浓度再分布,图 10 表示再分布 5 d 和 20 d 连续与间歇入渗下地下水中 NO_3^- 浓度分布。

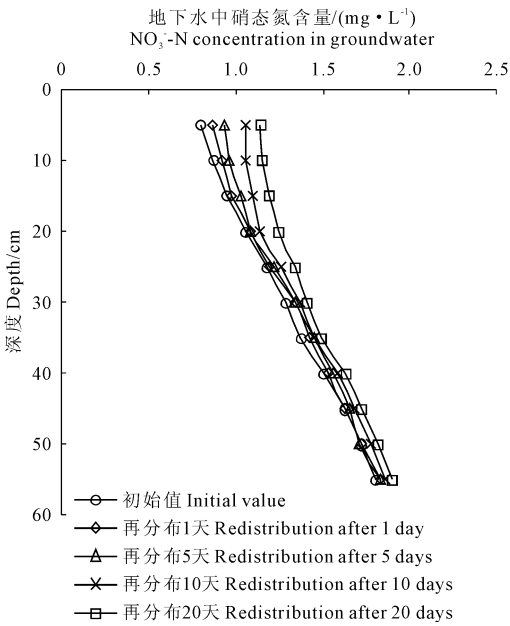


图 9 间歇入渗地下水中硝态氮浓度变化

Fig.9 Redistribution of NO_3^- concentration in groundwater under intermittent infiltration

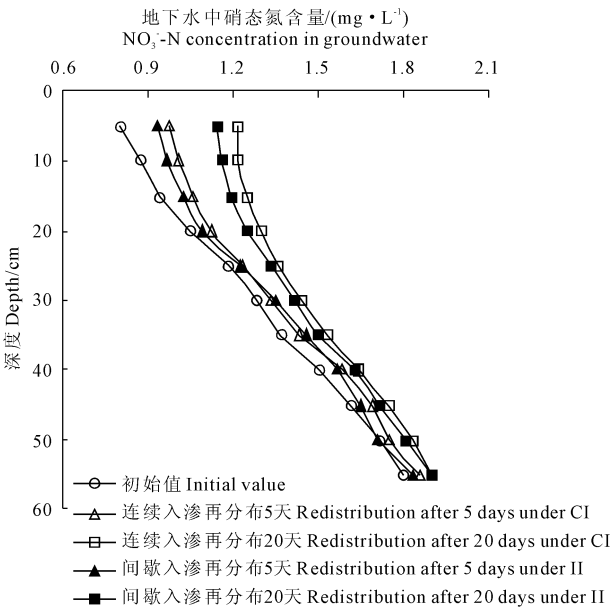


图 10 连续与间歇入渗下 NO_3^- 浓度的再分布

Fig.10 Redistribution of NO_3^- concentration in groundwater under continuous infiltration and intermittent infiltration

间歇入渗与连续入渗地下水中 NO_3^- 的分布趋

势基本一致。从图 9 可以看出,再分布过程中 NO_3^- 浓度值均大于初始值, NO_3^- 浓度随时间延长而增加,0~30 cm 深度内再分布 1、5、10、20 d 较地下水中初始浓度分别增加 0.04、0.08、0.13、0.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增加速率分别是 0.04、0.016、0.013、0.010 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,表明土壤中部分 NO_3^- 进到了地下水中,地下水中 NO_3^- 增加速率随分布时间的延长而减少;我国生活饮用水水质标准规定地下水水源中硝酸盐浓度低于 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 即合格^[10],表明波涌灌间歇入渗地下水水质完全可以满足生活饮用水的标准,不构成地下水环境污染;30~60 cm 深度内再分布 1、5、10、20 d 时 NO_3^- 浓度较地下水中初始浓度分别增加 0.02、0.04、0.07、0.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,分别占地下水 0~30 cm 深度 NO_3^- 浓度增加值的 49.04%、54.10%、51.85%、51.30%,说明深层地下水比浅层地下水受到污染的程度小。图 10 表明,间歇入渗较连续入渗地下水中 NO_3^- 浓度低,0~30 cm 深度内再分布 5 d 和 20 d 间歇入渗 NO_3^- 浓度增加值分别占连续入渗下的 82.48%、82.00%,30~60 cm 深度内再分布 5 d 和 20 d 间歇入渗 NO_3^- 浓度增加值分别占连续入渗下的 67.85%、84.26%,说明地下水中 NO_3^- 浓度增加值间歇入渗较连续入渗低,间歇入渗可以降低地下水环境污染,保护地下水水质。

3 结 论

通过连续垂直入渗和间歇垂直入渗试验,得到以下结论:

1) 土壤水在停水期的再分布降低了土壤水水势梯度,使间歇入渗较连续入渗的土壤水入渗和再分布更均匀;

2) 间歇入渗较连续入渗将水分与 NH_4^+ 、 NO_3^- 多而均匀地保存在浅层土壤中, NH_4^+ 向 NO_3^- 转化减弱,水分与养分的深层渗漏降低;

3) 间歇入渗较连续入渗进入地下水的 NO_3^- 含量低,说明波涌灌具有保肥和减小地下水污染等优点;

4) 间歇入渗地下水 NO_3^- 的浓度及其再分布的增长率较连续入渗低,对地下水水质的影响小,可以有效缓解农业施肥带来的地下水环境污染。

参 考 文 献:

- [1] 宰松梅.水肥一体化灌溉模式下土壤水分养分运移规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [2] 刘洪禄,吕 露,杨培岭,等.波涌灌间歇供水表面密实层特性的实验研究[J].灌溉排水,1997,16(4):6-11.
- [3] 尹 娟,费良军,朱悦发.灌水定额对波涌灌溉土壤中硝态氮浓度的影响[J].农业工程学报,2009,25(5):31-34.
- [4] 吴军虎,费良军,赵 茜,等.土壤间歇入渗水肥耦合特性试验研究[J].农业工程学报,2006,22(4):28-31.
- [5] 贾 辉.波涌灌间歇入渗氮素运移特性与地下水环境效应试验研究[D].西安:西安理工大学,2004.
- [6] 王 丁.层状土壤波涌灌间歇入渗氮素运移及对地下水环境影响试验研究[D].西安:西安理工大学,2009.
- [7] 费良军,贾 辉,孙廷容.波涌灌液相间歇入渗土壤和地下水中 NO_3^- 运移特性试验研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5):411-413.
- [8] 尹 娟.波涌灌间歇入渗氮素运移及对地下水 NO_3^- 分布特性影响试验研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [9] 习金根,周建斌.不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(3):271-275.
- [10] 中华人民共和国卫生部.GB5749-2006.生活饮用水卫生标准[S].河北秦皇岛:中国标准出版社,2006.

(上接第 141 页)

- [7] 顾本文,古文娟.灰色关联度分析在云南小春作物产量预报中的应用[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):45-48.
- [8] 黄中雄.南宁市水稻产量预报方法研究与实践[J].广西气象,2006,27(增刊):93-95.
- [9] 顾 宁,刘 静,陈彦虎,等.宁夏石嘴山市枸杞产量与气象条件的关系[J].宁夏农林科技,2009,(4):18-19.
- [10] 尹 东.农业产量预报技术的研究和应用[J].干旱气象,2007,25(2):12-16.
- [11] 侯志坚,姜 洋,赵志宇.商丘市棉花生长气候条件分析及产量预报模式研究[J].现代农业科技,2009,8:122.
- [12] 高永刚,王育光,Yannick CURNEL,等.世界粮食研究模型在黑龙江省作物产量预报中的应用[J].中国农业气象,2006,27(1):27-30.
- [13] 刘伟昌,陈怀亮,余卫东,等.基于气候适宜度指数的冬小麦动态产量预报技术研究[J].气象与环境科学,2008,31(2):21-24.
- [14] 孙 芳,林而达,武艳娟.宁夏气候变化及其对马铃薯生产的影响[J].中国农学通报,2008,24(4):265-471.
- [15] 张风华.城市防震减灾能力指标权重确定研究[J].自然灾害学报,2002,11(4):23-29.
- [16] 段晓凤,戴小笠,张玉兰,等.中宁红枣生长气象条件影响因素分析[J].中国农业气象,2010,31(增2):236-239.
- [17] 介玉新,胡 韬,李青云,等.层次分析法在长江堤防安全评价系统中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(12):1634-1637.
- [18] 段晓凤.黑龙江省黑土区气候-土壤生产潜力计算与分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.