

局部湿润灌溉土壤水分分布特征及其潜在环境效应

徐俊增^{1,2}, 卫琦^{1,2}, 彭世彰¹, 于艳梅^{1,2}, 张晓勇³

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 3. 江苏省东图城乡规划设计有限公司, 南京 210008)

摘要: 针对多种局部湿润的灌溉技术, 在概括其湿润体湿润特征的基础上, 总结了湿润体分布特征的影响因素、局部湿润灌溉土壤水分运动模拟和局部湿润灌溉的农田环境效应, 并从农田土壤氧化亚氮排放与土壤水分关系和局部灌溉土壤水分非均匀分布特征角度, 提出应该开展不同湿润体形式下土壤氧化亚氮排放规律及其对土壤水分分布的响应、高效减排的局部湿润灌溉灌水技术参数优化角度开展新的研究。

关键词: 局部湿润灌溉; 土壤水分分布; 环境效应; 氧化亚氮排放

中图分类号: S152.71 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2012)04-0001-06

Distribution characteristics of soil water under partial wetted irrigation and it's potential environmental effects

XU Junzeng^{1,2}, WEI Qi^{1,2}, PENG Shizhang¹, YU Yanmei^{1,2}, ZHANG Xiaoyong³

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Dongtu Urban and Rural Planning Design Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: The characteristics of wet body for several partial wet irrigation techniques were briefly introduced, as well as the influencing factors and the simulation of soil moisture moving and the environmental effect caused by partial wet irrigation. Then from nitrous oxide emission of agro-soils and its relation to soil moisture variation the non-uniform characteristics of soil moisture were put forward, some should be studied in future, included nitrous oxide emission rule and its responses to soil water distribution under partial wet irrigation, irrigation parameters optimization of partial wet irrigation for high irrigation uniformity and low nitrous oxide emission.

Key words: partial wetted irrigation; soil water distribution; environmental effects; nitrous oxide emission

1 概述

在水资源供需矛盾日益尖锐的背景下, 发展节水灌溉、更高效地利用现有水资源是农业水资源合理开发与利用的核心任务和必然选择。过去的20年里, 节水灌溉理论研究取得了长足进步, 节水灌溉技术得到了大面积应用, 在有效缓解水资源供需矛盾的同时, 使农田生态环境包括土壤特性、四水转化、氮磷迁移转化等发生一系列的变化^[1-3]。高效灌溉的生态环境效应被列为水利科学和水利工程领域农业水利工程专业方向当前的重点研究的方向之一。

目前多种节水灌溉技术出现了局部湿润特

征^[4-5], 局部湿润灌溉非饱和水分运动特征、湿润体内水分分布特征决定了其在水盐运移及淋失风险等方面具有有别于常规灌溉的效果, 但是在这样一种特殊的水分分布条件下农田氧化亚氮 N_2O 的排放规律会发生怎么样的变化是一个值得深入研究的问题。

2 局部湿润灌溉的土壤分布特征

2.1 局部湿润灌溉湿润体

目前常用的局部湿润灌溉技术包括点源滴灌、地下滴灌和蓄水坑灌, 这三种灌溉技术湿润体均存在水平方向和垂直方向的非均匀特征(图1)。点源滴灌有效水只存在于土壤湿润体内(如图1a), 湿

收稿日期: 2012-04-05; 修回日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179051); 河海大学中央高校基本科研业务费项目(2011B05514)

作者简介: 徐俊增(1980-), 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

作者简介: 彭世彰(1959-), 男, 上海人, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉及其农田生态效应研究。

润体大致有半椭圆形、半圆形和抛物形三种形状^[6]。地下滴灌(SDI)通过地理毛管上的灌水器把水或水肥的混合液缓慢供给到作物根区土壤中,借助毛细管作用或重力作用将水分扩散到整个根层供作物吸收利用,与地表滴灌相比,具有更加节水、节能、省工、增产、提高农产品品质以及改善土壤环境等优点^[7-12]。地下滴灌的湿润体(如图1b)一般为椭球或近似球体,其最显著的特点是可能出现表层一定深度土壤不湿润或仅很小部分湿润,呈现比地

表滴灌更加明显的非均匀分布特征^[13]。蓄水坑灌通过布设蓄水坑,使水通过蓄水坑侧壁入渗到土壤^[14-16],土壤土壤水分同样呈现非均匀特征,且表层一定深度内土壤可以不湿润(如图1c)。综上所述,局部灌溉湿润体具有较强的非均匀分布特征,其中地下滴灌和蓄水坑灌通过埋(坑)深的调节可以出现表层一定深度土壤不湿润的特殊湿润体分布,极大地改变了表层土壤的水分分布特征及灌水后的水分变化的剧烈程度。

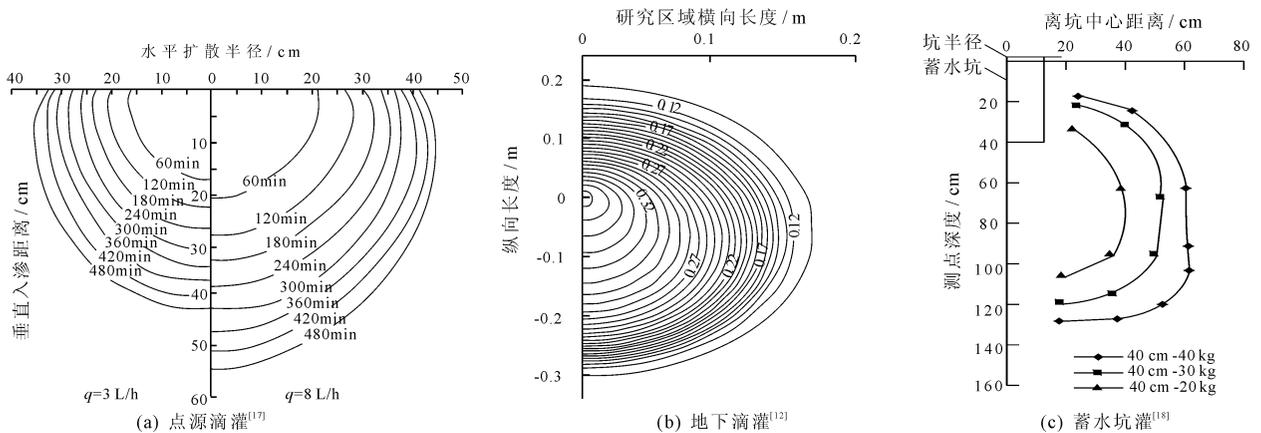


图1 三种典型局部灌溉的土壤湿润体

2.2 影响湿润体分布特征的因素

针对局部灌溉的湿润体特征,研究了湿润体分布特征的影响因素,并从提高灌溉水分布的均匀性角度研究如何通过灌溉技术参数的调控实现作物根层水分均匀供给与降低表土蒸发的统一^[19]。对于点源滴灌和地下滴灌,滴头流量、灌水时间、灌水量、灌水器埋深以及土壤特征因子(土壤容重、初始含水率)等是土壤湿润体的主要影响因素。土壤入渗湿润体在垂直方向距离和水平扩散距离均与灌水时间成幂函数关系,滴头流量和灌水器埋深对土壤入渗湿润体影响较大,而灌水量对土壤入渗湿润体的影响不明显,入渗湿润体的影响在垂直方向和水平方向的变化无显著差异^[20-22]。此外,土壤容重和初始含水率对点源滴灌湿润体特征有较明显的影响:在相同入渗时间内,其它条件一定时,大容重土壤的水平扩散距离明显大于小容重的土壤,垂直入渗距离小于低容重土;因此,针对不同流量的滴头,可以通过改变埋深和灌水时间改变其土壤湿润体的分布^[23-24]。

对于蓄水坑灌,灌水量、灌水时间、坑直径、坑深、初始含水率是土壤湿润体的主要影响因素。实验表明水平湿润锋和垂直湿润锋均随着时间的推移而增大,灌水量越大,湿润锋推进距离也越大。且在

同一时刻,坑直径越大,水平湿润锋推进距离越大,垂直湿润锋推进距离越小。此外,不同坑深条件下水平湿润锋和垂直湿润锋均随着时间的推移而增大,蓄水坑越深,水平湿润锋推进距离越小,而垂直湿润锋推进距离越大。此外,初始含水率越大,水平和垂直湿润锋推进距离也越大^[25-27]。

综上所述,局部灌溉的土壤湿润特征或土壤水分分布特征是可控的,通过调整灌溉技术参数(如地下滴灌的流量、灌水量;蓄水坑灌的坑的尺寸、蓄水灌溉量)可以实现对湿润体形状的人为调控,反过来可以实现灌水技术参数的优化设计。

2.3 局部灌溉土壤水分运动的数学描述

针对局部湿润灌溉的水分运移与土壤湿润体特征,国内外有关学者研究了土壤水分的分布(含再分布),给出了描述各自湿润体形状的方程。常用的主要包括平面流和柱状流模型。Brandt^[28-29]根据质量守恒定律和达西定律以及初始和边界条件变换成平面流数学模型,运用Newton-Raphson法数值计算求模型得出结果与试验结果吻合较好。李光永^[30]等假设土壤均质,各向同性,将点源的水分运动作物轴对称的二维问题处理,建立了柱坐标下的方程,在进行田间试验验证后,该模型比较真实地反映了点源入渗地下水运动,与实验结果吻合较好。此外,由美国

Salinity Laboratory 开发的 SWMS_2D 模型也被广泛用于模拟滴灌条件下的土壤湿润峰运移和水分分布^[31-32]。蓄水坑灌条件下,有关学者根据土壤水动力学原理和单坑入渗土壤水分运动的特点,建立了单坑二维土壤水分运动数学模型,采用有限单元法求解,并根据质量守恒原理建立了确定坑内水位变化过程的数学模型^[33]。运用上述数学描述或者模型,结合田间试验验证,可以开展不同灌水技术参数下的优化组合模拟,为不同土壤条件下局部灌溉湿润体调控的灌水技术参数优化提供了手段。

3 局部湿润灌溉的环境效应

3.1 水盐运移和积累

由于不同的灌溉方法对土壤水分含量、水分剖面分布、运动方向影响明显,因此局部湿润灌溉在一定程度上影响盐分的运移与积累。在进行局部湿润灌溉时,由于重力势和基质势的作用,水向各个方向运动,从滴头向周围运动时,带走一部分盐分,从而在根系范围内形成一个低盐区,为作物生长发育提供一个良好的环境。此外,相关试验表明局部湿润灌溉具有明显的洗盐作用,在土壤不同层次的盐分会有不同程度的降低^[34]。地下滴灌条件下均质中壤土的室内试验表明其水盐运移的特点是:滴头附近含水量最高,向周围湿润锋处逐渐降低。含水量在滴头周围对称分布,而含盐量的分布则是在滴头附近最低,向周围湿润锋处逐渐升高,即含水量和含盐量的分布范围基本相同,但含量高低相反^[35]。

另一方面,局部湿润灌溉条件下盐分又因为土壤蒸发随着水分的向上运动而逐渐向表层迁移、聚集,同时灌水量小、没有淋洗作用,出现明显的表聚现象,土壤剖面中层盐分含量低。随着灌溉年限的延长,土壤盐分在灌前聚集的层次逐渐向地表移动,不同深度土层的含盐量都有明显的增加,并且差异达到极显著水平。因此,局部湿润灌溉长期应用存在盐分累积的风险^[36-37]。

综上所述,局部湿润灌溉过程中形成了湿润体中心水分高、盐分低,盐分在湿润体周边聚集的现象,有助于作物生长,但长时间应用出现盐分在表层积聚现象。

3.2 氮素淋失风险

近年来,地下水 NO_3^- -N 污染已成为全球关注的热点问题。在不合理施用氮肥及过量灌水条件下, NO_3^- -N 在土壤剖面中大量累积并向下淋溶,从而污染地下水。局部湿润灌溉条件下,土壤中 NO_3^- -N 很

少被土壤颗粒所吸附,主要以溶质的形式存在于土壤溶液中,且易随水分的运动而运移,容易在湿润锋边缘产生积累。其运移规律和分布主要受土壤特性、灌水器流量、肥液浓度计灌水量、土壤含水量、水流运动状态和土壤物理性质的影响。据此,Bar-yosef^[38]等人对滴灌条件下黏土和砂土中水分、 NO_3^- 的分布进行了试验研究,结果表明,黏土中,灌水结束后,湿润体边缘有 NO_3^- 的积累,而湿润体内部 NO_3^- 浓度小于灌溉水中的浓度,砂土中也有类似的现象。沈仁芳^[39]等人进行室内土柱试验,认为 NO_3^- -N 迁移基本上随土壤水分运动,尤其是以对流为主。李久生^[40]等人利用室内试验,对滴灌点源施肥灌溉条件下 NO_3^- -N 和 NO_3^- - NH_4 的分布规律进行了研究,结果表明, NO_3^- -N 在距滴头一定范围内呈均匀分布,在湿润边界上硝态氮产生累积。局部湿润灌溉条件下,由于灌溉水量较小,产生的湿润体很小,极大地降低了深层渗漏,所以可有效调控水分运动,达到遏制氮淋失的目的。

相关试验表明降水和灌溉是影响氮素淋失的主要因素之一。隋方功等^[41]的研究表明,滴灌处理 100 cm 土层土壤溶液中的 NO_3^- -N 在整个甜椒生育期内显著低于常规施肥沟灌处理,滴灌施肥技术可以有效减轻土壤和地下水 NO_3^- -N 污染。Alva^[42]、习金根等^[43]研究表明,滴灌可以使表层土壤较快的湿润并达到所要求的水分,同时显著减少灌溉水的深层渗漏,提高灌溉水的利用效率。而且滴灌施肥显著地减少了 NO_3^- -N 向土壤下层的淋失,尤其是在容易发生养分流失、质地较粗的土壤上,滴灌施肥的效果更为明显。因此,局部湿润灌溉条件下,合理的施用氮肥是控制土壤 NO_3^- -N 淋失风险的关键所在。

综上所述,在局部湿润灌溉条件下,氮素主要以 NO_3^- -N 的形式存在,并且易随水分的运动而运移而在湿润锋边缘产生积累,局部湿润灌溉可有效降低深层渗漏,达到遏制氮淋失的目的。

3.3 水土保持效应

与传统的灌水方法相比,局部湿润灌溉不仅有效地减少了地面蒸发,而且由于局部湿润的水分诱导作用,有利于根系的深扎,从而有利于植株抗旱性能和水分的有效利用率的提高。同时在开展蓄水坑灌研究时还发现,蓄水坑灌技术实现了将节水灌溉与水土保持的有机结合,可以有效地解决水土流失问题。蓄水坑灌法的水土保持作用主要是通过拦蓄降雨径流而实现。一方面,蓄水坑可以承蓄降雨径

流,另一方面,与蓄水坑相连的田间输水沟堤,沿等高线将坡面分割成若干条带状区,沟堤可以拦截带状区的降雨径流,增加土壤入渗,同时阻断了坡面汇流。此外,蓄水坑灌法在控制水土流失的同时,也提高了当地降雨径流的利用率,对于过量的降雨,可以通过蓄水坑的中深层入渗,补给地下水,变地面径流为地下径流^[15]。此外,关于点源滴灌和地下滴灌的水土保持效应方面的研究很少,有待进一步研究。

4 农田土壤 N₂O 排放与土壤水分关系

N₂O 是重要的温室气体之一,农田土壤被认为是其最主要的排放源,已探明的全球 N₂O 排放中,90%以上来源于土壤系统,而农田土壤则占到了人为排放的46%以上^[44-47]。且由于 N₂O 具有极高的增温潜势,仅唯一的汇,寿命长达120年,其浓度正以 $0.8 \pm 0.2 \text{ppb} \cdot \text{Yr}^{-1}$ 的速度增加,因此农田 N₂O 排放的研究受到了广泛的关注^[48-49]。试验研究表明水分与肥料管理是农田 N₂O 排放的两个决定因素^[50],节水灌溉的应用导致农田土壤水分分布、变化幅度与频次、土壤与田间环境等的变化,必然导致土壤 N₂O 排放的变化,因此节水灌溉农田 N₂O 排放规律也开始受到了农田灌排有关研究人员的重视^[51]。试验表明土壤含水量影响土壤的通气状况和氧化还原状况,并通过影响 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 在土壤中的分布及其微生物的有效性,作用于硝化作用和反硝化作用,从而影响土壤中 N₂O 的产生与排放^[52]。当土壤含水量较低时,硝化作用和反硝化作用产生的 N₂O 均随土壤含水量的增大而增加,但当土壤含水量超过临界范围时, N₂O 的排放逐渐减弱。此外,灌溉和降雨也会通过控制土壤水分的变化来影响 N₂O 产生与排放,灌溉或降雨后农田土壤水分干湿的剧烈变化导致了 N₂O 排放的增加,这是由于灌溉或降雨后土壤含水率较高,达到或超过田间持水率出现 N₂O 排放量低谷的缘故,随含水率降至土壤饱和含水率的75%左右出现排放峰^[53-55]。一般认为灌溉或降雨后农田土壤存在一个适宜于 N₂O 排放的土壤水分范围。

5 土壤水分非均匀分布下土壤 N₂O 排放研究展望

在常规灌溉条件下,土壤水分呈均匀分布,土壤中 N₂O 的排放与土壤水分含量的高低及变化剧烈

程度有关,通常认为降雨和灌溉后水分的剧烈变化会导致 N₂O 排放的短期激增,同时最适宜 N₂O 排放的土壤含水率范围一般认为是90%~100%的田间持水率或77%~86%的饱和含水率范围^[56-58]。但对局部灌溉条件下可能出现的土壤水分不均匀分布可能导致的农田土壤 N₂O 排放研究还有待开展, Scheera 曾在其研究展望中也提出“非均匀湿润的地下施氮、滴灌、灌溉施肥很可能是实现农田 N₂O 减排的有效措施”^[59]。因此,研究水分非均匀分布特征与农田土壤温室气体 N₂O 排放关系,探索其调控机理,对于更好地认识土壤水分与农田 N₂O 排放关系,进一步探索“如何通过合理灌溉调控土壤湿润体特征减少农田温室气体排放”具有重要的理论意义与学术价值。迫切需要以地下滴灌或蓄水坑灌这两项具有明显非均匀湿润体分布特征的灌溉技术为切入点,重点针对表层土壤湿润状态,开展如下几个方面的研究工作:

(1)水分垂直分布对土壤 N₂O 排放的影响。研究不同水分垂直分布条件下的 N₂O 排放规律,明确土壤水分垂直分布特征对土壤 N₂O 排放的影响,并确定对其影响最大的临界表层土壤水分变化范围的深度。

(2)不同湿润体形式下土壤氧化亚氮排放规律及其对土壤水分分布的响应。通过对灌水技术参数(如地下点源滴灌不同埋深、灌水流量和灌水量,蓄水坑灌的灌的坑的尺寸、蓄水灌溉量)的调控形成不同的湿润体形状,研究不同水分状态范围内的土壤氧化亚氮 N₂O 排放,得到不同典型湿润体的 N₂O 排放规律及其分布特征,进而分析土壤水分水平或垂直分布与土壤 N₂O 排放之间的关系,明确局部土壤湿润条件下 N₂O 排放的主要影响因素,建立不同深度土壤水分湿润特征与 N₂O 排放之间的定量关系。

(3)高效减排的局部湿润灌溉灌水技术参数优化。借助相关的土壤水分运动模型(如 Hydrus-3D),模拟得到不同灌水技术参数组合相应的土壤水分分布及其特征参数,根据“土壤水分湿润特征与氧化亚氮排放之间的定量关系”估算土壤 N₂O 排放,以水分有效性与 N₂O 减排为目标,得到不同类型土壤的局部湿润灌溉灌水技术参数的组合。

6 结 语

在水资源危机、气候变化、粮食安全等多重因素下,发展节水高效农业是必然趋势,以滴灌、地下滴灌、蓄水坑灌为代表的局部湿润灌溉将成为今后的

一个发展方向,由于高效灌溉土壤水分状态产生了巨大差异,使土壤中诸多物理、化学、生物过程发生了变化,“高效灌溉的生态环境效应”研究是当前水利科学和水利工程领域重点研究方向,目前针对局部湿润灌溉关注较多的是土壤盐分累积和硝态氮淋失风险等环境问题,而对其中农田温室气体排放这一重要内容的研究还有待开展。作为影响土壤 N_2O 排放的最主要因素,水分的含量及其变化过程均会显著影响农田土壤 N_2O 排放,局部灌溉技术的应用提出了“土壤水分非均匀分布特征与农田土壤 N_2O 排放之间的关系及其调控机理”这一新的科学问题。迫切需要开展土壤水分非均匀分布条件下土壤 N_2O 排放规律及其与土壤水分分布之间的关系研究,揭示地下灌溉技术参数变化对农田 N_2O 排放的影响及其机理,并从“灌溉调控形成理想水分分布、减少 N_2O 排放角度”,寻求局部灌溉条件下灌溉水高效利用与降低 N_2O 排放增加幅度相统一的地下滴灌灌水技术参数组合,为从灌溉调控角度实现农田温室气体减排提供新的思路。

参考文献:

- [1] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响[J]. 土壤学报,1999,36(4):484-491.
- [2] 乔欣. 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J]. 水利学报,2011,42(7):862-868.
- [3] 杨世江,栾航,张智勇,等. 考虑生态环境效应的节水灌溉研究进展[J]. 中国科技信息,2006(8):137-138.
- [4] 李明思,康绍忠. 点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):32-35.
- [5] 胡和平,高龙. 地表滴灌条件下突然湿润体运移方程[J]. 清华大学学报,2010,50(6):839-843.
- [6] 丁浩,李明思. 滴灌土壤湿润区对棉花生长性状及产量影响的试验研究[D]. 石河子大学,2009.
- [7] Camp C R. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern coastal plain [J]. Trans of the ASAE, 1997,40(4):993-999.
- [8] 马孝义,康绍忠. 果树地下滴灌灌水技术田间试验研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(1):57-61.
- [9] 李久生. 层状土壤质地对地下滴灌灌水氮分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2009,25(7):25-31.
- [10] Oron G, Demalach Y, Gillerman L, et al. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 1999,39:19-33.
- [11] Burt C M, Al-Amoudi O, Paolini A. Salinity patterns on row crops under subsurface drip irrigation on the westside of the San Joaquin Valley of California [R]. ITRC Report No. 003-004, 2003.
- [12] 李道西,罗金耀. 地下滴灌土壤水分运动数值模拟[J]. 节水灌溉,2004(4):4-7.
- [13] 王超,李援农. 地下滴灌条件下湿润体特性的试验研究[J]. 中国农村水利水电,2011(3):38-40.
- [14] 栗岩峰. 非均质土中蓄水多坑水分运动的数值模拟与试验分析[D]. 太原理工大学,2003.
- [15] 孙西欢. 蓄水坑灌法及其水土保持作用[J]. 水土保持学报,2002,16(1):130-132.
- [16] 郭向红. 蓄水多坑三维土壤水分运动数值模拟与试验研究[D]. 太原理工大学,2005.
- [17] 赵颖娜,汪有科,马理辉. 不同流量对滴灌土壤湿润体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(4):30-35.
- [18] 吴能峰. 蓄水坑灌法土壤水分运动的田间试验研究[D]. 太原理工大学,2007.
- [19] 李明思,孙海燕. 滴头流量对土壤湿润体的影响研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):420-422.
- [20] 魏群. 不同灌水技术要素对地表滴灌交汇入渗特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):29-34.
- [21] 岳海英,李援农. 滴灌土壤湿润体含水率分布规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(2):137-138.
- [22] 王振华,郑旭荣. 土壤初始含水率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动影响的试验研究[J]. 2008,27(5):77-79.
- [23] 李京玲,孙西欢. 蓄水坑灌单坑土壤水分运动模型的有限体积法求解[J]. 农业机械学报,2011,42(5):63-67.
- [24] 张振华,蔡焕杰. 滴灌土壤湿润体影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(2):17-20.
- [25] 汪增涛. 蒸发条件下蓄水坑灌法单坑水分运动数值模拟及分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(33):16474-16475.
- [26] 郭向红,孙西欢,马娟娟,等. 蓄水单坑入渗土壤湿润体影响因素分析与模拟[C]//. 现代节水高效农业与生态灌区建设. 2008:730-737.
- [27] 孙西欢,马娟娟. 蓄水坑灌法技术要素初探[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5-6):405-407.
- [28] Brandt A, Bresler E, Ben-Asher, et al. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1971,35:675-682.
- [29] Brandt A, Bresler E, Ben-Asher, et al. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1971,35:683-689.
- [30] 李光永,曾德超. 地理点源滴灌土壤水分运动规律的研究[J]. 农业工程学报,1996,12(3):66-71.
- [31] Simunek J, Vogel T, va Simunek J, et al. The SWMS-2D code for simulating water flow and solute transport in 2-dimensional variably saturated media, Version 1. 21 [R]. California; US Salinity Laboratory, USDA, ARS,

- Riverside, 1994.
- [32] Meshkat M, Warner R C, Workman S R. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1999, 125(6):315-323.
- [33] 郭向红,孙西欢. 蓄水坑灌单坑土壤水分运动有限元模拟[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10):1-5.
- [34] 王兴鹏,严晓燕. 不同灌溉方式下枣树根区土壤洗盐效果试验[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1):130-133.
- [35] 王振华,吕德生. 地下滴灌条件下土壤水盐运移特点试验研究[J]. *石河子大学学报*, 2005, 23(2):85-87.
- [36] 戈鹏飞,虎胆. 吐马尔白. 棉田膜下滴灌年限对土壤盐分积累的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(5):118-122.
- [37] 殷波,柳延涛. 膜下长期滴灌土壤盐分的空间分布特征与累计效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6):228-231.
- [38] Bar-Yosef B, Sheikholami M R. Distribution of water and ions in soil irrigated and fertilized from a trickle source [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40:575-582.
- [39] 沈仁芳,赵其国. 排水采集器原装土柱中红壤元素淋溶的研究[J]. *土壤学报*, 1995, 32(S):178-181.
- [40] 李久生,饶敏杰. 喷灌施肥均匀性对冬小麦产量影响的田间试验评估[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(6):38-42.
- [41] 隋方功,王运华. 滴灌施肥技术对大棚甜椒产量与土壤硝酸盐的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2001, 20(4):358-362.
- [42] Alva A K, Mozaffari M. Nitrate leaching in a deep sandy soils influenced by dry broadcast or fertigation of nitrogen for citrus production [C]// *Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation*. Israel, Technion - IIT, Haifa, 1995:67-77.
- [43] Xi J G, Zhou J B. Leaching and transforming characteristics of urea-N added by different ways of fertigation [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3):271-275.
- [44] 王保刚,马娟娟,孙西欢. 节水灌溉条件下土壤水氮运移特性研究综述[J]. *技术与应用*. 2010, 11:22-24.
- [45] Li C S, Zhuang Y H, Cao M Q, et al. Comparing a process based agri-ecosystem model to the IPCC methodology for developing a national inventory of N₂O emissions from arable lands in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001(60):159-175.
- [46] Li C S, Qiu J J, Froelking S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980-2000 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20):1972-1975.
- [47] Li C S, Zhuang Y H, Froelking S, et al. Modeling soil organic carbon (SOC) change in cropland of China [J]. *Ecological Application*, 2003, 13(2):327-336.
- [48] 孙志强. 农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6):1524-1529.
- [49] 卢妍. 植物对沼泽湿地生态系统 N₂O 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(4):72-75.
- [50] 刘惠,赵平. 华南丘陵区针叶林和果园地表 N₂O 通量的日变化[J]. *生态环境*, 2008, 17(3):1116-1119.
- [51] 董玉红,欧阳竹,李运生,等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5):83-88.
- [52] 彭世彰,侯会静. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8):14-18.
- [53] 李香兰,徐华. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. *土壤*, 2009, 41(1):1-7.
- [54] 邹建文,黄耀,宗良纲. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6):758-764.
- [55] 田光明,何云峰. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3):294-298.
- [56] 李勇先,田光明. 不同水分管理模式下水稻土氮素形态转化与 N₂O 释放的关系[J]. *生态环境*, 2003, 12(2):157-159.
- [57] 彭世彰,杨士红. 农田土壤 N₂O 排放的主要影响因素及减排措施研究进展[J]. *河海大学学报*, 2009, 37(1):1-7.
- [58] 李香兰,徐华. 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. *土壤*, 2009, 41(1):1-7.
- [59] Scheera C, Wassmann R, Kienzler K. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40:290-301.