

文章编号:1672-3031(2018)05-0373-12

现代灌溉水肥精量调控原理与应用

李久生, 李益农, 栗岩峰, 赵伟霞, 王 珍, 王 军

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘要: 过去15年间, 中国水利水电科学研究院水利研究所瞄准现代灌溉农业集约化和精量化发展目标, 重点围绕不同生态区域、不同尺度农田的水肥施用与多过程综合调控中存在的问题, 系统开展了现代灌溉水肥精量调控研究, 取得了系列化的成果: 考虑土壤空间变异和层状质地对水肥分布的影响, 改进了微灌系统的设计方法; 在干旱区和半湿润区等不同气候区, 选取小麦、玉米、棉花和蔬菜等典型作物, 全面考虑水力学参数、土壤水肥动态和淋失、环境参数以及作物产量和品质等因素对微灌均匀系数的响应机制进行研究, 提出了微灌均匀系数分区标准; 在国内率先开展了变量灌溉理论和控制技术的研究, 发展了适用于缺水地区的非充分变量灌溉理论; 从系统安全、环境安全和水肥高效利用出发, 揭示了再生水滴灌对系统性能和环境的影响机制, 定量评价了再生水中养分的有效性; 研发了低压高均匀灌水器、多功能系列喷头和智能灌溉施肥机等装置, 实现了灌水施肥性能的提升; 形成了区域化的喷、微灌水肥高效利用模式。上述成果为进一步提高农田水肥利用率、推动喷、微灌理论和技术进步提供了支撑。

关键词: 喷灌; 微灌; 施肥; 变量灌溉; 再生水

中图分类号: S275.5

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.006

1 引言

喷灌和微灌作为现代灌溉技术的主要形式, 在我国的应用已有40余年历史, 尤其近10余年间, 在持续增加的财政投入和土地流转政策直接推动下, 我国的喷、微灌进入快速发展时期。微灌面积以每年27%的速度增长, 2015年已增至527万 hm^2 , 世界排名第一; 喷灌面积也在快速增长, 2015年已达到373万 hm^2 , 世界排名第三(CNCID, 2016)^[1]。“十三五”期间, 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》要求新增高效节水灌溉面积666.7万 hm^2 , 其中喷、微灌面积399万 hm^2 , 加快推进高效节水灌溉已成为重大的国家战略需求。现代灌溉农业的快速发展对灌溉工程和系统运行管理提出了新的更高要求。当前, 我国灌溉工程装备水平不断提升和灌溉管理水平相对滞后的矛盾愈显突出, 农田水肥利用率低以及由此引发的面源污染风险等问题仍在不断加剧。我国化肥用量仍居高不下, 农作物亩均化肥施用量21.9 kg, 是美国的2.6倍, 欧盟的2.5倍, 面源污染等生态环境问题日趋严重^[2]。面对发展现代灌溉农业的集约化和精量化要求, 提升喷、微灌技术的研究尺度、克服土壤和环境参数空间变异的影响、突破规模化喷、微灌系统设计和水肥管理中的技术难题, 成为进一步发挥喷灌和微灌技术水肥调控优势、推动我国农业现代化、实现农业生产方式转变的关键因素。

中国水利水电科学研究院水利研究所在灌溉水肥管理方向的研究始于2000年代初期, 在改进喷、微灌设计、运行和管理及提高水肥利用率等方面进行了广泛深入的研究, 对于消除应用初期存在的水肥一体化可能对根区环境产生危害、导致水氮淋失等疑虑, 系统解决施肥灌溉设备配套、系统设计和运行管理等方面的技术难题, 推动喷、微灌技术和水肥一体化管理规模化发展发挥了积极作用。现代灌溉技术的规模化应用和集约化管理促使传统的灌溉活动发生许多深刻的变化, 农田尺

收稿日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790531)

作者简介: 李久生(1962-), 男, 河北邢台人, 博士, 研究员, 主要从事灌溉原理与技术研究。E-mail: lij@s@iwhr.com

度提升、应用区域变化以及灌溉水源多样化都给灌溉技术的应用和发展提出了新的课题。本文对近15年间,水利研究所在现代水肥精量调控方面取得的主要成果及创新进行回顾和综述。

2 水肥精量调控理论与方法提升

2.1 非均质土壤滴灌水氮运移分布规律 全面掌握滴灌条件下不同质地土壤中的水肥运移分布规律是科学制定滴灌水肥管理措施的基础。以往的研究中多将土壤简化为均质,忽略了实际应用中广泛存在的土壤层状质地变化。层状结构土壤会改变施肥灌溉中的水肥运移分布模式,进而影响作物生长及产量。为此,选取了砂土-砂壤土(SL)、砂壤土-砂土(LS)、砂壤土-砂土-砂壤土(LSL)等几种常见的层状质地结构研究了地表和地下滴灌条件的土壤水氮运移规律及其对作物产量与品质的影响。结果表明,地表滴灌施肥条件下^[3],在上细下粗或上粗下细的层状土壤中均存在一个限制水流向下运动并增加水平向运移的阻水界面。相对于均质土壤,灌水器流量对上细下粗土壤(LS、LSL)的水分分布影响较小。在均质土壤的滴灌系统设计中为了获得较大的湿润深度,常会选择小流量灌水器,但该方法对层状土壤不一定有效。地下滴灌室内试验表明^[4],在SL层状土壤中,灌水器埋设在质地变化界面以下较埋设在界面以上更能促进水分向下层土壤运动。对于LSL层状土壤,灌水器埋设在上层壤土时,77%的水分会储存在上层土壤中,而埋设在下层壤土中时,93%的水分分布在下层土壤中。在华北平原日光温室番茄生长季节内,进一步研究了层状土壤质地变化对田间水肥动态和作物生长的影响^[5]。对土壤水分的监测表明,层状土表层20cm的土壤含水量明显低于砂壤土(图1),2006年SL、LSL和未扰动的砂壤土对照处理(L)的土壤含水率的季节平均值分别为0.19、0.22和0.25 cm³/cm³,2007年分别为0.18、0.19和0.26 cm³/cm³。层状土表层土壤含水率的大幅下降导致果实产量的显著降低(表1)。将两年产量数据平均后,SL和LSL处理的产量比L处理分别降低33%和12%。室内和田间试验结果均表明,在设计地下滴灌系统时,遇到层状结构土壤时需谨慎选择灌水器的埋设深度。对于上粗下细层状土壤,应避免选择地下滴灌。

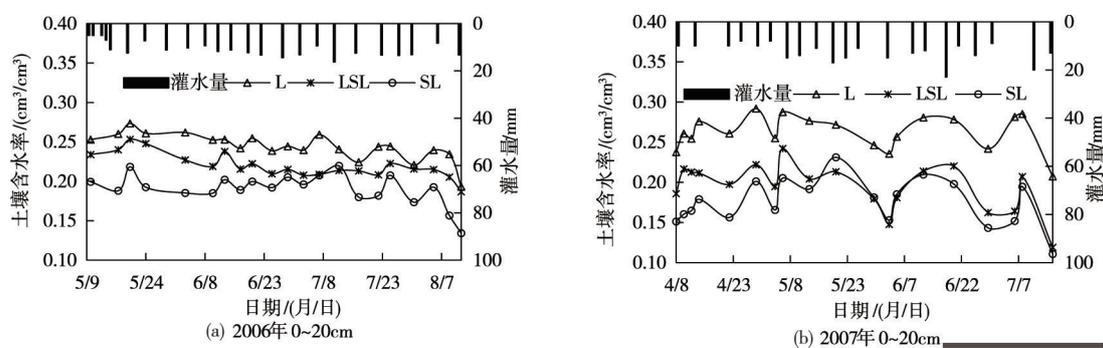


图1 土壤含水量的季节性变化(试验于华北平原温室室内进行,各处理滴灌器埋深为15cm)

表1 番茄产量和品质的比较

年份	处理	单果重/g	产量/(t/hm ²)	维生素C/(mg/100g)	可滴定酸/(mg/g)	可溶性糖/%	可溶性固形物/%	糖酸比
2006	L	214	63.9	15.53	4.73	3.17	4.37	6.80
	LSL	202	53.0	16.20	4.83	3.52	4.33	7.36
	SL	174	43.7	15.30	4.67	3.20	4.43	6.89
	ANOVA	*(P=0.019)	*(P=0.002)	*(P=0.028)	NS(P=0.934)	NS(P=0.123)	NS(P=0.918)	NS(P=0.782)
2007	L-15-150	207	64.8	17.73	4.27	1.89	4.47	4.47
	LSL-15-150	187	60.9	19.13	4.10	1.69	4.17	4.23
	SL-15-150	148	43.0	18.20	4.27	1.94	4.27	4.59
	ANOVA	*(P=0.001)	*(P=0.003)	NS(P=0.158)	NS(P=0.930)	NS(P=0.175)	*(P=0.002)	NS(P=0.827)

注: NS为不显著影响; *为显著影响,显著水平为0.05。

2.2 微灌系统性能分区评价理论 均匀系数是微灌系统设计和评价的关键指标。采用高的均匀系数虽有利于获得均匀的水分和养分分布,但可能增加系统投资和运行费用。目前,不同国家已制定出了各自的滴灌系统均匀性的设计和评价标准。如美国农业工程师学会标准EP405.1(ASAE, 2003)推荐均匀系数(Emission Uniformity, EU)标准为70%~95%^[6]。我国国家标准《微灌工程技术规范》(GB/T 50485-2009)建议克里斯琴森均匀系数CU高于80%^[7]。然而,我国多数微灌工程的实际运行压力长期低于设计工作压力,对于现行均匀系数标准是否有进一步降低空间存在很多争议。由于国内外均缺乏喷、微灌均匀系数对土壤水肥分布和作物产量、品质的系统研究,对均匀系数降低产生的水氮淋失风险缺乏定量评估,进而无法对滴灌发展中提出的这一问题予以准确回答。为此,提出了考虑水肥施入过程、土壤中分布和淋失及作物吸收状况的均匀性评价新思路,在灌溉施肥性能研究中,首次阐明了施肥与灌水均匀性之间的差异,提出系统设计和运行管理要同时考虑灌水和施肥均匀性的观点。在均匀系数分区标准研究中,综合考虑了华北和西北等不同的气候区及土壤空间变异特性的影响,针对玉米、棉花和温室蔬菜等4种作物连续开展15季试验^[8-11],研究提出了不同生态区的微灌均匀系数标准,克服了单纯水力学观点的不足,创立了考虑水力学、作物响应、水肥动态及淋失全过程均匀性的系统性能评价理论。

在灌溉施肥性能研究方面,选取国内常用的商业化施肥装置,利用田间试验评估了施肥装置类型对施肥灌溉均匀性的影响^[12],结果表明,水动式比例泵和文丘里施肥器的施肥量变异系数与灌水变异系数非常接近(式(1)、式(2)),而压差施肥罐的施肥量变异系数(CV_F)约为灌水变异系数(CV_W)的两倍(式(3))。

$$CV_F = 1.00CV_W \quad \text{比例泵} \quad (1)$$

$$CV_F = 1.02CV_W \quad \text{文丘里} \quad (2)$$

$$CV_F = 2.03CV_W \quad \text{压差式施肥罐} \quad (3)$$

以上结果表明,微灌系统在实现均匀灌溉的同时不一定能够实现均匀施肥。建立的施肥与灌水均匀性之间的定量关系为微灌系统的设计和管理中施肥装置的性能评价与选型提供了依据。

在均匀系数分区标准研究方面,从2009年开始,针对微灌均匀系数对水、氮和盐动态变化以及作物产量和品质的影响开展了连续多年的试验研究。供试作物包括华北平原半湿润地区的温室蔬菜^[8]和玉米^[11]以及中国西北干旱地区的棉花^[10]等,试验中CU变化范围为55%~90%。在砂壤土和粉砂壤土中,3种作物全生育期内的土壤含水率均表现出较高的均匀性。通过对土壤氮素空间分布的定期观测发现,均匀系数对土壤氮素分布的均匀性没有显著($P<0.05$)影响。均匀系数对作物生长和产量的影响与区域有关。图2给出了6年田间试验的结果,可以看出在华北平原半湿润地区,当均匀系数变化范围为57%~99%时,玉米和白菜产量没有明显变化,相对产量变化范围为0.99~1.02。这与5年的德克萨斯州高原试验结论相一致^[13]。而在干旱地区,当均匀系数从65%增至80%时,棉花产量随均匀系数的增加明显增长。主要原因是,半湿润地区较大的降雨量削弱了低均匀系数引起的土壤水肥分布不均匀性。因此,在干旱地区宜采用比湿润地区更高的均匀系数。近年来,利用二维土壤水分运移和作物生长耦合模型对棉花产量与CU的响应关系的模拟结果也印证了田间试验的结论,并确定滴灌系统最佳均匀系数为75%^[14]。

灌溉施肥不均匀引起的深层渗漏和氮素淋失是优化滴灌系统均匀系数的重要指标。在半湿润地区透水性较好的砂壤土中,强降雨和较大的作物氮需求量极易引起深层渗漏和氮素淋失,因此在华北平原四个玉米生长季节内开展了评估CU的田间试验^[15-16],CU的变化范围为59%~97%。结果表明,深层渗漏主要由灌溉季节中的强降雨引起,氮素淋失主要受施氮量影响,均匀系数的影响相对较小。基于该地区32年(1980—2011年)的气象资料的数值模拟结果也获得了类似结论^[16]。

土壤空间变异也是造成作物生长和产量不均匀的一个重要原因。为研究微灌系统水力性能和土壤空间变异对作物产量的相对重要性,在华北平原进行了相关的地下滴灌玉米试验^[17]。供试农田为砂壤土,空间变异程度弱到中等。图3比较了水力特性(制造偏差、滴头流量和施肥量)、土壤参数

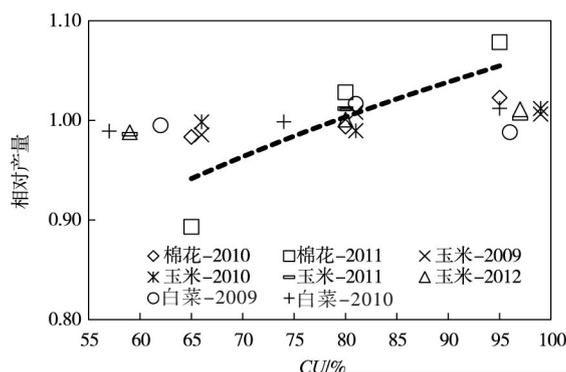


图2 干旱地区黏壤土的棉花产量、半湿润地区砂壤土的玉米和白菜产量与滴灌系统克里斯琴森均匀系数(CU)的函数关系；相对产量为作物产量与平均产量的比值

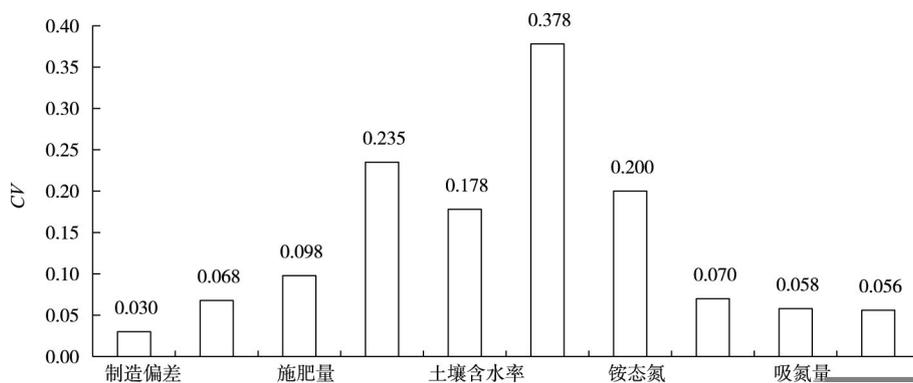


图3 灌水器水力参数、土壤特性、作物吸氮量以及产量变异系数的比较

试验于华北平原玉米生长期内进行,试验设计包括3个灌水器埋深(0、15和30cm)和2种施肥装置(压差式施肥罐和文丘里施肥器)

(饱和导水率、土壤含水率、硝态氮和铵态氮含量)和作物参数(地上生物量、吸氮量和籽粒产量)的变异系数。结果表明,灌水不均匀仅能解释38%的土壤含水率均匀系数变化,施肥不均匀可分别解释硝态氮和铵态氮变异系数变化的26%和49%。值得注意的是作物吸氮量和产量比滴头流量、施肥量和土壤水氮含量的分布更均匀。可以看出,土壤空间变异在一定程度上造成了产量分布的不均匀。利用数学模型进一步针对滴灌系统均匀系数和土壤空间变异性对氮素淋失的影响进行了数值模拟研究^[18]。结果表明,氮素淋失量随CU的升高而减少,随土壤质地空间差异的增大显著增大,与田间试验的结论一致。经过8年试验和模拟研究,得出在半湿润或湿润地区,从提高作物产量和品质、减小氮素淋失等方面考虑,微灌均匀系数不宜低于60%;在干旱地区推荐使用更高的均匀系数(75%~80%)。

2.3 再生水滴灌技术 滴灌在使用再生水灌溉时较地面灌溉和喷灌具有明显的优势。再生水滴灌的堵塞问题往往成为事关系统成败的关键。再生水中有机物质沉积、细菌滋生、活性离子氧化和高pH值可能会促进生物膜生长,从而导致灌水器堵塞。为评估再生水滴灌系统堵塞问题,分别使用二级再生水和地下水开展了为期83d的灌溉试验^[19],试验过程中,每隔10d对灌水器流量进行测定,对有/无压力补偿装置、流量范围为1.0~2.6 L/h的6种灌水器进行了测试,发现使用再生水灌溉的灌水器堵塞更严重,其平均流量比使用地下水的灌水器低26%。在灌溉初期灌水器中堵塞物的形成非常缓慢,一旦平均流量比($Dra, \%$,式(4))降至90%~95%堵塞会迅速增加。后续研究^[20]及中国农业大学针对不同水源(地下水、不同盐度的地表水和再生水)和灌水器的研究^[21]均证实了灌水器堵塞阈值的存在。因此,为防止灌水器堵塞,应尽量控制流量百分数在堵塞阈值之上,长时间维持系统高性能运行,而加氯加酸处理是控制灌水器堵塞的最经济方式之一。为评估不同加氯模式对灌水器堵塞的控制效果,开展了一系列针对不同灌水器的相关试验,试验中加氯量以控制毛管末端余氯浓度范围为0~10 mg/L进行调整,加氯间隔设置为1周~4周^[22]。研究发现,加氯处理可明显减轻灌水器

堵塞, 对小流量灌水器堵塞控制效果更好。与低频高浓度加氯方式相比, 高频低浓度加氯方式可更好的保持系统处于良好的运行状态。在此基础上, 课题组又开展了针对不同再生水水质条件下的灌水器加氯加酸模式优化试验^[23-24]。结果发现, 再生水中典型化学离子(如 Fe^{2+} 和 Ca^{2+})浓度对灌水器内堵塞物质形成过程及堵塞物质成分影响显著。较低浓度的 Fe^{2+} (0.8 mg/L)会明显促进微生物生长和堵塞物质的形成, 采用一周一次加氯措施(保持系统余氯浓度 2 mg/L)可有效降低堵塞风险; 再生水中 Ca^{2+} 浓度 ≥ 180 mg/L时, 灌水器堵塞以化学堵塞为主, 仅采取加酸措施(pH值 5.0, 2周一次)即可有效减轻系统堵塞。

$$Dra = 100 \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{q_{new}} \quad (4)$$

式中: q_i 为堵塞试验过程中第 i 个灌水器的流量(L/h); q_{new} 为试验开始前新灌水器的平均流量(L/h); n 为测试流量的灌水器个数。

土壤环境及作物对加氯措施的响应也是判断加氯模式适宜性的重要指标。为研究加氯间隔和加氯浓度对植株生长、产量、果实品质以及灌水器堵塞的影响, 我们分别在日光温室和大田内以番茄和玉米为研究对象进行了4个生长季的二级再生水滴灌试验^[25]。日光温室番茄试验中, 加氯间隔为2周~8周, 加氯浓度为2~50 mg/L, 研究表明, 加氯间隔、加氯浓度以及二者的交互作用对两年番茄的株高、叶面积、产量或品质均无显著影响。大田玉米试验中, 加氯浓度设置为1~8 mg/L, 加氯历时设置为0.5~3 h, 研究表明, 随着加氯次数的增加, 0~40 cm土壤中氯离子含量增加, 根区土壤酶活性和玉米吸氮量呈降低趋势, 但余氯浓度和加氯历时对作物生长和产量的影响未达到显著水平。综上可知, 对于像番茄和玉米这种对氯中度敏感的作物, 加氯处理是安全的。为进一步评估余氯分布不均匀性对土壤环境及作物生长的影响, 在大田试验中对余氯分布及土壤酶活性和作物生长指标进行了监测, 结果发现再生水滴灌系统采用加氯处理, 余氯浓度随距毛管入口距离增加呈指数函数衰减, 余氯浓度及其沿毛管的不均匀性对华北平原滴灌玉米的土壤酶活性、作物生长和产量未产生不利影响, 但仍推荐采用低浓度、长历时的加氯运行方式, 以降低高浓度余氯对土壤环境可能产生的负面影响。

再生水中富含的养分元素及盐分离子等物质可能会对土壤肥力及养分转化过程产生影响。为评估这一影响, 进行了2年大田玉米试验, 试验中设置灌溉水质(二级再生水和地下水)、滴灌带埋深(0 cm、15 cm和30 cm)和灌水量(70% ET_c 、100% ET_c 和130% ET_c , ET_c 为作物需水量), 选择土壤介质中参与氮、磷等养分循环的脲酶、磷酸酶、蔗糖酶等为研究对象, 定量评价了不同灌溉方式、灌溉制度下土壤酶活性的响应规律^[26]。结果表明, 再生水地面灌和滴灌后碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性在土壤剖面均呈层状分布。灌水量对土壤酶活性的影响随土壤深度、生育阶段和酶活性类型而变化; 较小滴灌带埋深明显提高了表层土壤酶活性, 而较大滴灌带埋深显著提高了深层土壤酶活性。灌溉前后碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性与土壤有机质、全氮、全磷和pH显著相关; 脲酶活性在玉米生育前期促进尿素水解和氮素矿化, 后期促进氮素吸收和生物固持。与地下水灌溉相似, 再生水地下滴灌提高了根区土壤酶活性, 没有干扰和改变土壤C、N、P养分转化, 不会对土壤肥力水平造成负面影响。

在再生水灌溉养分有效性方面, 开展了再生水滴灌盆栽和大田试验, 定量评估了再生水氮素对玉米生长的有效性^[27-29]。结果表明, 再生水灌溉提高了土壤氮素含量, 特别是增加了氮素在深层土壤中的分布。盆栽试验中, 增加施氮量抑制了玉米对再生水氮的吸收, 施氮量从0增加到2.64 g/盆时, 再生水氮利用率从45%降到33%。和地下水灌溉相比, 再生水灌溉能促进玉米对肥料氮的吸收, 提高总氮吸收量, 但降低了肥料氮对玉米吸氮量的贡献率。¹⁵N示踪-肥料当量法可用于定量评估再生水氮对玉米生长的有效性, 再生水氮的肥料替代当量与施氮量之间为二次曲线关系, 增加施氮量会降低再生水氮的有效性, 等氮素施入量下再生水中的氮对玉米生长的有效性仅相当于50%~69%尿素氮。再生水灌溉能促进玉米生长和提高玉米产量。在试验基础上, 基于HYDRUS-2D/3D和DNDC

模型, 构建了滴灌条件下土壤水分、氮素运移转化模型及玉米作物生长模型, 评价了不同灌溉水质、不同施氮量和不同灌水量对氮素淋失、转化及玉米生长的影响。综合试验及模型模拟结果得出, NO_3^- 淋失和氮素表观损失量与施氮量呈正相关关系, 再生水灌溉时适当降低施氮量能有效减少氮素损失, 提高氮素利用率; 华北平原再生水滴灌玉米优化灌水量为 $75\%ET_0$, 施氮量为 $140 \sim 160 \text{ kg/hm}^2$, 玉米再生水滴灌可减施约 20 kg/hm^2 尿素氮。

再生水中可能存在的盐离子、重金属及微生物可能会对人类健康和环境构成威胁。为了评估再生水滴灌条件下病原体污染风险, 以大肠埃希氏菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)为对象开展了一系列研究。通过室内试验, 在不同流量($1.05 \sim 5.76 \text{ L/h}$)和大肠杆菌浓度($10^2 \sim 10^7 \text{ CFU/ml}$)条件下, 对大肠杆菌在非饱和砂土和砂壤土中的运移情况进行了研究^[30]。结果表明, 土壤质地对大肠杆菌迁移过程影响明显, 砂土中 *E. coli* 浓度沿远离滴头方向逐渐减小, 在距湿润锋 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 的范围内无 *E. coli*, 砂壤土条件下, 土壤对 *E. coli* 的吸附作用较强, 灌溉水中 *E. coli* 绝大部分被截留在表层 5 cm 范围内, 且集中在饱和湿润区附近。灌水器流量和 *E. coli* 浓度的增加会促进大肠杆菌的迁移, 从而使大肠杆菌在两种土壤中的分布范围更广, 浓度更高。在污水处理过程中, 减少再生水中细菌浓度对于降低再生水灌溉引发土壤病原体污染风险是非常重要的。之后, 我们利用室内试验成功构建了土壤水分和大肠杆菌运移模型^[31]。模型的模拟效果较好, 并帮助我们更清晰认识了大肠杆菌在非饱和土壤中运移过程。为了探究中等浓度大肠杆菌再生水用于滴灌的可能性, 在温室内开展了2年莴笋地表和地下滴灌试验, 试验设置了3个灌溉周期(4、8和12 d)和3个灌水量水平(蒸发皿系数0.6、0.8和1.0)^[32]。结果表明, 地下滴灌可以防止病原体污染。频繁灌溉和高浓度大肠杆菌会增加短期内土壤大肠杆菌污染。收获时, 莴笋茎中未发现大肠杆菌, 而在叶子上发现了少量的大肠杆菌, 但叶片大肠杆菌污染与灌溉无必然联系。以上结果表明, 利用再生水灌溉时, 采用较长的灌水间隔(如7 d左右), 地下滴灌可避免大肠杆菌污染。

3 变量灌溉理论与控制技术研究与应用

随着我国农村新型城镇化建设和土地流转制度的改革, 农业规模化、现代化发展趋势为大型喷灌机的应用提供了更为广阔的空间。在集约化农田尺度内, 定点灌溉解决土壤特性和作物生长的空间变异问题将为研究者和设计者带来新的挑战。变量灌溉具有解决这些困难的潜力, 目前研究较多的国家有美国、加拿大、澳大利亚等^[33-35]。2012年我们率先在国内开始了变量灌溉研究与探索, 成功研发出中国第一套具有自主知识产权的圆形喷灌机变量灌溉系统^[36], 该系统为3跨加悬臂组成的长 140 m 的圆形喷灌机, 可通过调节安装在喷头上方的电磁阀占空比和喷灌机运行速度实现变量灌溉。与传统变量灌溉系统不同, 各管理区内的喷头数量和沿喷灌机桁架方向的控制分区数量均不是预先设定, 而是根据实际生成的管理区形状和大小进行设定; 基于无线射频识别技术研发的地缘识别器, 可代替GPS实现沿喷灌机行走方向的角度分区控制。

对变量灌溉系统水力性能的测试结果表明, 由于电磁阀开-闭状态和喷灌机走-停状态的非耦合作用, 变量灌溉系统的实际灌水深度与设计水深之差略大于均一灌溉系统^[36], 这种现象也同样出现在商业化的圆形喷灌机变量灌溉系统中。将电磁阀的脉冲周期设定为圆形喷灌机行走时间和停止时间的最大公约数, 可更加精确的控制灌水深度^[37]。表2为田间观测试验结果, 当喷灌机百分率计时器限制为 60 s 且时间百分数设定为 50% 时, 将电磁阀脉冲周期设为 30 s 可实现灌水深度平均绝对误差(MAE)和平均偏差(MBE)的最小化。

在华北平原冲积区, 建立了基于土壤可利用水量的变量灌溉管理分区方法^[38], 根据 1.0 m 深度土壤可利用水量变化范围, 田块被划分成4个管理区。通过田间试验, 研究了冬小麦和夏玉米对变量灌溉和均一灌溉的响应。结果表明, 与均一灌溉相比, 变量灌溉的节水效果与作物生长季节中的降雨量高度相关。对于夏玉米, 生长季节中降雨频繁, 变量灌溉的总灌水量比均一灌溉处理低 14% , 而冬小麦均一灌溉与变量灌溉的总灌水量大致相等^[38]。作物生长和产量的差异在管理区之间达到了显

著水平,提出了同一田块内不同管理区具有不同水分生产潜力的假定^[39]。为了发展半干旱气候条件下的冬小麦非充分变量灌溉理论,在不同管理区内设置了不同水分亏缺程度的非充分灌溉试验。试验验证了不同管理区具有不同水分生产函数的假定,以水分生产效率最高为目标得到的管理区1、2、3内适宜变量灌水比例为100%、89%和94%^[40]。为了发展半湿润气候条件下的夏玉米变量灌溉制度,在不同管理区内对比研究了土壤水分传感器法、水量平衡法、水量平衡+降雨预报法对夏玉米生长和产量的影响。结果表明,与基于水量平衡法、水量平衡+降雨预报法制定的变量灌溉制度相比,土壤水分传感器法分别节水22%和20%,且产量无显著差异^[41]。

表2 不同电磁阀工作周期下变量灌溉系统灌水深度的平均绝对误差(MAE)和平均偏差(MBE)

周期/s	时间百分数/%	MAE/mm	MBE/mm
50	50	1.56	-1.56
35	50	1.59	-1.59
30	50	0.95	-0.95
20	50	2.24	-2.24

受限于土壤水分传感器较高的成本,选择土壤水分传感器适宜埋设位置,减少监测点密度,是土壤水分传感器技术在精准农业中应用时亟待解决的关键问题之一。借助变量灌溉技术分区管理的思想,提出了均一灌溉管理方式下,根据作物对水分亏缺的敏感程度,将土壤水分传感器布置在最易发生干旱的管理区或面积最大的管理区内的布设方法^[42]。通过田间试验,对比研究了均一灌溉和变量灌溉处理土壤含水率时间稳定性。结果表明,变量灌溉管理虽然改变了整个农田土壤含水率的空间分布结构,但每个管理区内的土壤含水率时间稳定性依然存在,因此基于土壤含水率时间稳定性原理,提出了将变量灌溉系统土壤水分传感器网络布置在每个管理区内直接代表平均土壤含水率点位的方法^[43]。为了克服通过时间稳定性原理找到直接代表平均土壤含水率点位至少需要通过一季田间试验,周期较长^[44]的缺陷,提出了基于土壤黏粒含量的土壤水分传感器埋设位置预判方法。研究发现,直接代表平均土壤含水率点位的黏粒含量与对应管理区内平均黏粒含量之间呈线性关系(图4)^[43],这一关系可以作为确定土壤水分传感器埋设位置的预判准则。

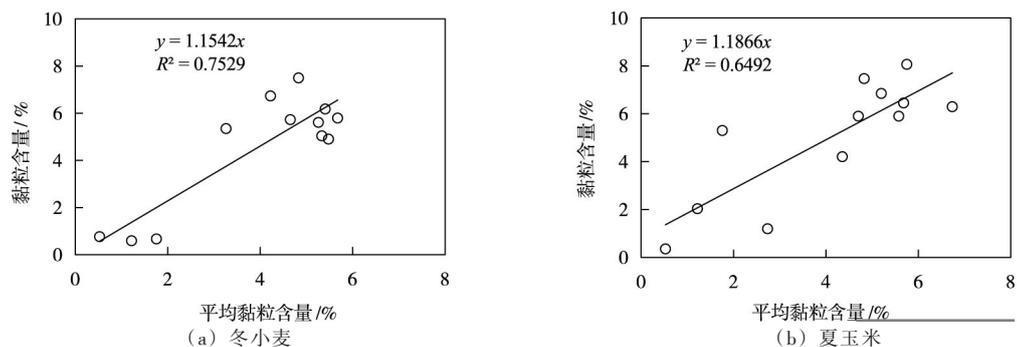


图4 冬小麦和夏玉米生育期内0~0.6m土层直接代表平均含水率点位的黏粒含量(y)与管理区内平均黏粒含量(x)的线性关系

4 灌水施肥设备性能改进与配套装置研发

4.1 低压高均匀灌水器

针对低压下灌水器均匀系数下降、流道易堵塞等世界性难题,借助多因素正交试验与CFD数值模拟手段,研究揭示了2~6m工作压力下流道内流态转化特征以及悬浮颗粒分布规律变化的机制,首次提出兼顾水力性能和抗堵塞性能的低压滴灌灌水器结构优化设计指标,确定了低压下影响灌水器抗堵塞性能的流道宽度阈值为0.6mm。创建的常压和低压下高均匀性灌水器设计理论与方法,保证了灌水器的流态指数始终处于0.43~0.49之间,灌水器流量偏差低于2.5%,

达到国际上公认的高灌水性能。基于创建的地表滴灌高均匀性灌水器设计理论与方法, 创制出系列化的高均匀性灌水器, 常压下灌水器出流均匀性较同类产品提高 10% 以上, 低压下的高均匀灌水器流量偏差为 1.25%, 流态指数 0.45, 达到国际 A 类产品标准。基于构建的低压压力调节器设计方法, 研发出具有启动压力低、调压范围宽、性能稳定的低压压力调节器, 出口预置压力分别为 0.06、0.08 和 0.1 MPa, 产品性能达到国际 A 类产品标准, 保障了地形起伏较大状况下的滴灌系统均匀精量施灌, 适宜不同地区(特别是山丘区)规模化农业生产对精量灌水(施肥)的需求^[45]。

4.2 多功能系列喷头 针对现有喷头适用范围窄、运行稳定性差的缺陷, 发明了具有记忆功能的旋转角度控制装置和自动换向装置, 实现喷洒角度 40°~360°连续可调, 使喷头在人为触碰后, 能够在下次启动时自动回复到原来设定的角度, 喷头旋转到设定的喷洒角度后, 自动实现反向旋转; 同时在换向装置及旋转角度控制装置之间增设具有离合器功能的弹片导轨部件, 使得喷头在有外力扭动时做自由旋转, 保护喷头部件免受损坏。为了进一步简化喷头结构, 发明了无需齿轮传动机构的射线喷头旋转角度调节装置和外置流量调节装置, 解决了现有旋转射线喷头无法在喷头工作状态下对旋转角度进行有效调节的问题, 扩大了喷头的流量调节范围, 喷头的流量调节范围扩大到 0.46~0.94 m³/h, 覆盖了国内外射线喷头全部系列规格的流量范围, 制造成本降低了 20%。定型了齿轮传动、散射式、涡轮驱动和旋转射线喷头等 4 个系列多功能喷头产品^[46], 年产逾 160 万只, 累计销售额逾 1 亿元, 国内市场占有率达 20%, 产量的 1/3 出口美国、巴西、墨西哥、伊朗等国家。

4.3 智能灌溉施肥机 针对目前国产灌溉施肥机功能单一、智能化程度低、运行不稳定等突出问题, 研制开发了具有自主知识产权的智能灌溉施肥机。系统研究了微灌上常用的 5 种文丘里施肥器, 采用工业 CT 扫描和三维成像技术相结合的方法, 对不同类型文丘里施肥器的内部流场尺寸进行了精确标定, 在此基础上研发了适用于智能灌溉施肥机的短流道文丘里施肥器。重新设计了施肥机的系统构架, 克服了传统国产施肥机功能单一的问题, 深入探索了将加压单元、注肥单元、过滤单元和控制单元进行系统集成的组构方案, 实现了加压、调酸、注肥、灌溉等多功能的智能化集成, 并可根据环境条件、作物类型和灌溉面积等条件灵活设置轮灌组、灌水频率、灌水时长等灌溉控制技术参数。在设计原理上, 该施肥机与传统的施肥机具有较大差别, 采用的无肥液混合罐设计节省了施肥机结构空间, 提高了肥液的 pH、EC 值的稳定性, 解决了传统施肥机运行不稳定的问题。同时, 基于免费的开源安卓系统, 开发了具有水肥调控、环境监控、故障诊断、云服务、系统设置等多种功能的控制软件系统。与国外同类产品相比, 成本降低一半, 具有广阔的市场前景^[47]。

5 区域化应用及适用性评价

5.1 喷灌水肥高效利用模式 在华北平原和内蒙古地区分别开展了灌水和施肥交互作用对土壤水氮运移和玉米生长指标及产量影响的田间试验^[48], 同时, 利用根区水质模型(RZWQM)和作物生长 DS-SAT 模型开展了灌溉施肥制度优化模拟研究, 定量评估了影响作物生长的主控因子, 构建和完善了玉米模型数据库, 在利用田间试验数据对模型进行率定和验证的基础上, 利用 40 年气象资料对不同水文年型下灌溉制度和施肥制度进行模拟优化, 得出内蒙古地区枯水年的最优方案为玉米生育期内灌水 11 次, 灌溉定额 269 mm, 施氮总量为 170~175 kg/hm², 1 次追施; 平水年为玉米生育期内灌 9 次水, 灌溉定额 220 mm, 施氮总量为 165~170 kg/hm², 1 次追施; 丰水年为玉米生育期内灌 7 次水, 灌溉定额 180 mm, 施氮总量为 180 kg/hm², 分 3 次追施。

5.2 滴灌水肥热高效利用模式 针对华北秋冬季温室白菜, 对比了不同滴灌水热调控措施的可行性, 发现灌溉水加温仅对灌水过程中的表层土壤影响较大, 覆膜的影响主要体现在生育前期, 而覆膜与灌溉水加温相结合的水热调控效果最为显著, 可以明显提高白菜生育后期的土壤温度, 结球期 10~30 cm 土层的日平均土壤温度可以增加 1~3℃, 增产幅度达 11%。首次系统研究了滴灌水热调控对氮素转化机制的影响, 发现覆膜与增加灌溉水温结合可使表层土壤脲酶活性增强 18%~30%, 天门冬酰胺酶活性增强 50%~180%, 极大地促进了尿素水解和有机氮矿化等氮素转化过

程,使0~20 cm表层土壤有机氮矿化量提高5%~38%。

针对东北半湿润区膜下滴灌玉米,系统研究了覆膜滴灌对土壤水肥热变化、农田小气候特征、水氮转移吸收规律以及产量的影响机理,揭示了膜下滴灌技术的节水增产机制,得出膜下滴灌的平均产量分别比不覆膜滴灌和地面灌提高11%和21%,水分利用效率分别提高9%和18%。通过开展玉米膜下滴灌水肥优化管理试验,发现膜下滴灌的水肥调控机制在于通过分次施氮和合理控制施氮量,改善氮素在生育期内的分配状况和土壤中的分布特征。提出了黑龙江地区玉米膜下滴灌的水肥优化管理模式为生育期分3次施氮,施氮量150~200 kg/hm²[49]。

5.3 基于分布式农业水文模型和遥感数据的节水灌溉技术地区适应性评价方法 为了回答不同地区和不同降雨年型节水灌溉技术的适应性问题,以松嫩平原为研究对象,实地调查分析研究区现有灌溉技术模式以及投入与产出情况,查阅文献资料获取研究区土壤类型、种植结构、气象数据和灌水数据。考虑区域尺度各要素的空间变异性,建立了基于分布式农业水文模型(GSWAP-EPIC)的区域节水灌溉效益评价方法,弥补了以往仅利用效益评价指标体系进行统计和打分评价的不足,实现了对灌溉效益的动力学模拟^[50]。利用试验数据和遥感反演ET数据以及产量数据等率定模型参数,评价了松嫩平原发展节水灌溉的效益,得出平水年和干旱年节水灌溉(大型喷灌机与小型移动式喷灌系统)玉米单产可增加达20%~30%,净收益提高11%~52%(图5),为制定节水灌溉区域发展战略提供了依据。

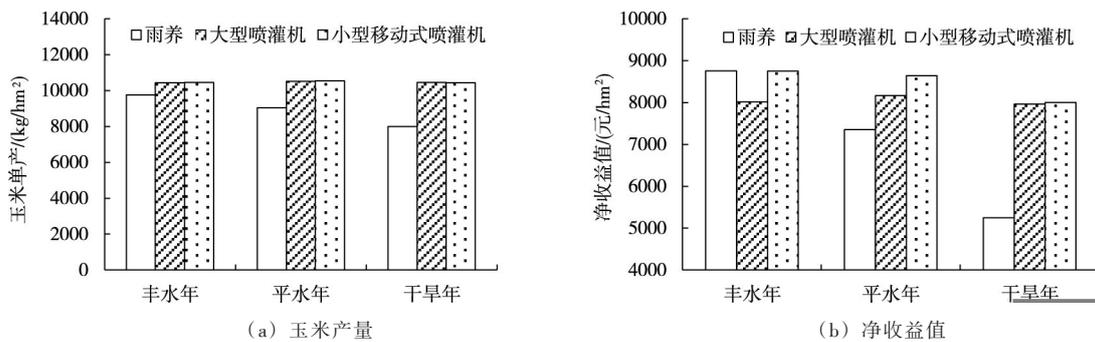


图5 2000—2013年松嫩平原不同水文年不同灌水情景玉米产量和净收益比较

6 进一步研究方向

(1)水肥亏缺诊断和决策。现代测试、遥感和信息技术等在农业上的大量应用,为实现水分和养分实时监测和科学诊断提供了有效手段。在当前农业生产向集约化和智能化转变的新形势下,农田土壤水肥含量和作物亏缺状况的大范围、无损和快速检测技术成为研究的热点。应用光谱探测技术、无人机遥感和无线网络等技术,研发遥感、便携式、车载和无人机机载等多样化的水肥诊断和实时监测技术与装备,进一步开展多尺度、多源水肥决策信息的识别、表达与融合方法研究是急需努力的方向。

(2)水肥精量调控。实现由静态管理向动态管理转变,建立集作物水肥需求信息采集、智能化预报决策支持、水肥精量控制为一体的灌溉施肥系统成为当前灌溉水肥管理的发展方向。进一步深入研究集约化管理模式下灌溉施肥过程中的水肥损耗机制和途径,建立适合不同作物、不同生态区域、不同生产条件及灌溉方式的水肥管理参数优化方法,开发包括灌水施肥性能评价、土壤水肥分布、作物吸收和生长模拟的灌溉施肥系统运行全过程模拟技术,将为实现灌溉施肥系统的智能化管理措施提供有力工具。

(3)灌溉施肥的环境效应。农业灌溉活动对生态环境的影响日益受到重视,不合理灌溉施肥引发的面源污染风险也在逐渐增加。系统研究气候变化环境下农田生态环境与灌溉施肥活动的相互影响机理,探索不确定性耦合参数影响下的农田生态系统多过程协同调控方法,建立科学的灌溉施肥管

理环境影响评价体系, 提出安全、高效的灌溉水肥调控措施对推动现代灌溉技术的可持续发展具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] 国际灌排委员会 . CNCID 简报总第五十八期 2016 年第 11 期[EB/OL] . [2016-12-01] . <http://www.cncid.org/cncid/gpdt/webinfo/2016/11/1468229391194918.htm>.
- [2] 中华人民共和国农业部 . 到 2020 年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL] . [2015-04-01] . http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201503/t20150318_4444765.htm.
- [3] LI J, JI H, LI B, et al . Wetting patterns and nitrate distributions in layered-textural soils under drip irrigation [J] . *Agricultural Science in China*, 2007, 6(8): 970-980 .
- [4] LI J, LIU Y . Water and nitrate distributions as affected by layered-textural soil and buried dripline depth under subsurface drip fertigation[J] . *Irrigation Science*, 2011, 29: 469-478 .
- [5] 刘玉春, 李久生 . 毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J] . *水利学报*, 2009, 40(7): 782-790 .
- [6] JOSEPH S . Design and Installation of Microirrigation Systems[S] . ASAE, 2003 .
- [7] 微灌工程技术规范: GB/T 50485-2009[S] . 北京: 中国计划出版社, 2009 .
- [8] LI J, ZHAO W, YIN J, et al . The effects of drip irrigation system uniformity on soil water and nitrogen distributions[J] . *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2): 415-427 .
- [9] ZHAO W, LI J, LI Y, et al . Effects of drip system uniformity on yield and quality of Chinese cabbage heads[J] . *Agricultural Water Management*, 2012, 110: 118-128 .
- [10] GUAN H, LI J, LI Y . Effects of drip system uniformity and irrigation amount on cotton yield and quality under arid conditions[J] . *Agricultural Water Management*, 2013, 124: 37-51 .
- [11] ZHANG H, LI J . The effects of drip irrigation uniformity on spatial and temporal distributions of water and nitrogen in soil for spring maize in North China Plain[J] . *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 4004-4013 .
- [12] LI J, MENG Y, LI B . Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J] . *Irrigation Science*, 2007, 25: 117-125 .
- [13] BORDOVSKY J, PORTER D . Effect of subsurface drip irrigation system uniformity on cotton production in the Texas High Plains[J] . *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24 (4): 465-474 .
- [14] WANG J, LI J, GUAN H . Evaluation of drip irrigation system uniformity on cotton yield in an arid region using a two-dimensional soil water transport and crop growth coupling model[J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(3): 351-364 .
- [15] WANG Z, LI J, LI Y . Effects of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region [J] . *Irrigation Science*, 2014, 32 (3): 221-236 .
- [16] WANG Z, LI Y, LI Y . Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China Plain [J] . *Agricultural Water Management*, 2014, 142: 19-28 .
- [17] 李久生, 杜珍华, 栗岩峰, 等 . 壤土特性空间变异对地下滴灌水氮分布及夏玉米生长的影响[J] . *中国农业科学*, 2008, 41(6): 1717-1726 .
- [18] WANG Z, LI J, LI Y . Assessing the effects of drip irrigation system uniformity and spatial variability in soil on nitrate leaching through simulation[J] . *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(1): 279-290 .
- [19] LI J, CHEN L, LI Y . Comparison of clogging in drip emitters during the application of sewage effluent and groundwater[J] . *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(4): 1203-1211 .
- [20] LI J, CHEN L, LI Y, et al . Effects of chlorination schemes on clogging in drip emitters during application of sewage effluent[J] . *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(4): 565-578 .
- [21] PEI Y, LI Y, LIU Y, et al . Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J] . *Irrigation Science*, 2014, 32: 141-157 .

- [22] LI J, LI Y, ZHANG H . Tomato yield and quality and emitter clogging as affected by chlorination schemes of drip irrigation systems applying sewage effluent[J] . *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(10): 1744–1754 .
- [23] HAO F, LI J, WANG Z, et al . Effect of ions on clogging and biofilm formation in drip emitters applying secondary sewage effluent[J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66: 687–698 .
- [24] HAO F, LI J, WANG Z, et al . Effect of chlorination and acidification on clogging and biofilm formation in drip emitters applying secondary sewage effluent[J] . *Transactions of the ASABE*, 2018 . doi: 10.13031/trans.12764 .
- [25] 郝锋珍 . 化学处理对再生水滴灌灌水器堵塞及土壤环境与作物生长的影响[D] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018 .
- [26] QIU Z, LI J, ZHAO W . Effect of applying sewage effluent with subsurface drip irrigation on soil enzyme activities during the maize growing season[J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66: 723–737 .
- [27] GUO L, LI J, LI Y, et al . Nitrogen utilization under drip irrigation with sewage effluent in the North China Plain [J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66: 699–710 .
- [28] GUO L, LI J, LI Y, et al . Balancing the nitrogen derived from sewage effluent and fertilizers applied with drip irrigation[J] . *Water, Soil and Air Pollution*, 2017, 228: 1–15 .
- [29] GUO L, LI J, LI Y, et al . Nitrogen availability of sewage effluent to maize compared to synthetic fertilizers under drip irrigation[J] . *Transactions of the ASABE*, 2018, doi: 10.13031/trans.12779 .
- [30] WEN J, LI J, LI Y . Wetting patterns and bacterial distributions in different soils from a surface point source applying effluents with varying *Escherichia coli* concentrations[J] . *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (7): 1625–1637 .
- [31] WEN J, LI J, WANG Z, et al . Modelling water flow and *Escherichia coli* transport in unsaturated soils under drip irrigation[J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66: 738–749 .
- [32] LI J, WEN J . Effects of water managements on transport of *E. coli* in soil–plant system for drip irrigation applying secondary sewage effluent[J] . *Agricultural Water Management*, 2016, 178(1): 12–20 .
- [33] O'SHAUGHNESSY S A, EVETT S R, COLAIZZI P D . Dynamic prescription maps for site–specific variable rate irrigation of cotton[J] . *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 123–138 .
- [34] SUI R, FISHER D K . Field test of a center pivot irrigation system[J] . *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, 31(1): 83–88 .
- [35] YARI A, MADRAMOOTOO C A, WOODS S A, et al . Performance evaluation of constant versus variable rate irrigation[J] . *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(2): 501–509 .
- [36] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等 . 田间试验评估圆形喷灌机变量灌溉系统水量分布特性[J] . *农业工程学报*, 2014, 30(22): 53–62 .
- [37] 赵伟霞, 李久生, 王春晔, 等 . 设置电磁阀启闭循环周期的方法及装置: ZL201410635754.4[P] . 2017–02–15 .
- [38] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等 . 基于土壤水分空间变异的变量灌溉作物产量及节水效果[J] . *农业工程学报*, 2017, 33(2): 1–7 .
- [39] ZHAO W X, LI J S, YANG R M, et al . Crop yield and water productivity responses in management zones for variable–rate irrigation based on available soil water holding capacity[J] . *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(5): 1659–1667 .
- [40] LI X M, ZHAO W X, LI J S, et al . Application of Deficit Irrigation Management to Variable Rate Irrigation for Winter Wheat In Sub–arid Climat[C]//ASABE Annual International Meeting . Washington, 2017 .
- [41] ZHAO W, LI X, LI J, et al . Water use and productivity of maize under different variable rate irrigation managements in sub–humid climates[C]//ASABE Annual International Meeting . Washington, 2017 .
- [42] 赵伟霞, 李久生, 栗岩峰, 等 . 一种确定土壤水分监测仪器埋设位置的方法和装置: ZL201410814832.7 [P] . 2016–01–27 .
- [43] ZHAO W X, LI J S, YANG R M, et al . Determining placement criteria of moisture sensors through temporal stability analysis of soil water contents for a variable rate irrigation system[J] . *Precision Agriculture*, 2018, 19: 648–665 .
- [44] 赵伟霞, 李久生, 王珍, 等 . 滴灌均匀性对土壤水分传感器埋设位置的影响[J] . *农业工程学报*, 2018, 34

- (9): 123-129.
- [45] 王建东, 龚时宏, 李光永, 等. 低压下流道结构参数对锯齿型滴头水力性能影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 72-78.
- [46] 栗岩峰, 李久生, 尹剑锋. 再生水对园林升降式喷头水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 56-61.
- [47] 谢冬辉, 吴文勇, 王振华, 等. 不同喉管结构对文丘里施肥器性能影响的研究[J]. 节水灌溉, 2017, (9): 5-9.
- [48] WEN J, LI J, LI Y. Response of maize growth and yield to different water and nitrogen schemes on very coarse sandy loam soil under sprinkler irrigation in the semi-arid region [J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64: 619-636.
- [49] LIU Y, LI J, LI Y. Effects of split fertigation rates on the dynamics of nitrate in soil and the yield of mulched drip-irrigated maize in the sub-humid region[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(1): 103-117.
- [50] 王军. 松嫩平原喷灌技术适用性评价研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.

Principle and application of precise regulating water and fertilizers for modernized irrigation technologies

LI Jiusheng, LI Yinong, LI Yanfeng, ZHAO Weixia, WANG Zhen, WANG Jun

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: During the last 15 years, the Department of Irrigation and Drainage of China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR) conducted extensive studies on the precise management and regulation of water and fertilizers to meet the development needs of intensive and precision irrigated agriculture. These studies mainly focus on the water and fertilizer management for different scale fields in different ecological regions as well as regulation across multiple processes. The main findings were highlighted in this paper. The standards of micro irrigation uniformity were studied with respect to many aspects of water and solute dynamics, environmental effects, and crop yield and quality under a wide range of environments from arid to subhumid climates for typical wheat, cotton, maize and vegetable crops. As a result, new target uniformity values have been recommended. The design principles and methods of drip irrigation system were updated, considering the spatial variability of soil properties along vertical and lateral directions. We initiated the studies of variable rate irrigation (VRI) to make this new technology adapt to the water limited environments. Many efforts have been made to improve the performance of low-pressure emitters, landscape sprinklers and fertilizer injectors. Typical efficient use modes of water and fertilizers were established in different regions to aid the extension of sprinkler and microirrigation technologies. These results have greatly contributed to updating the knowledge on water and fertilizer management and increasing water and fertilizer efficiency of sprinkler and microirrigation.

Keywords: irrigation; fertigation; precise regulating; variable rate irrigation; sewage effluent

(责任编辑: 祁 伟)