

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.001

西北灌区地下水资源开发利用 研究进展及发展趋势

魏晓妹, 降亚楠

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 围绕西北灌区地下水资源开发利用面临的问题,分析了灌区地下水的基本特征及调蓄功能,重新审视了合理开发利用地下水资源对灌区可持续发展的重要支撑作用。在此基础上,从变化环境下西北灌区地下水循环与演化机制、灌区地表水与地下水联合调控、灌区地下水开采模式及机井合理布局、灌区地下水管理机制4个方面归纳分析了国内外研究现状及进展,针对西北灌区地下水资源开发利用研究中存在的关键科学问题,探讨了灌区地下水资源开发利用科学与技术研究发展的趋势。

关键词: 西北灌区;地下水循环;联合调控;机井布局;管理机制

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0001—10

Recent Progress in the Development and Utilization of Groundwater Resources in Northwestern Irrigation Districts

WEI Xiaomei, JIANG Yanan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Recent progresses in the development and utilization of groundwater resources in northwestern irrigation districts were summarized in this paper. Groundwater is very important to the sustainable development of northwestern irrigation districts, therefore the basic characteristics and its regulation and storage effects was analyzed firstly, which is very helpful to realize its rational development and utilization. Then the following issues were discussed in detail, which are groundwater dynamics, its evolution mechanism, conjunctive use and management with surface water, development strategy and pumping well layout optimization, management system. Finally, several important future research questions were proposed.

Keywords: northwestern irrigation district; groundwater dynamics; conjunctive management; pumping well layout; management policies

我国西北地区指新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古六省、自治区范围内的黄河流域、内陆干旱区和干旱草原区^[1],总面积为345万km²,占全国国土面积的35.9%。该区深居内陆腹地,气候干旱,降水稀少,生态环境脆弱,大部分地区属于干旱、半干旱地区,天然降水不能满足农作物生长的正常需水要求,因此,农业的发展对灌溉有很强的依耐性^[2]。

西北地区灌溉农业发展历史悠久,早在战国时

期,郑国渠的修建成为渭河流域最早的农田灌溉供水工程,后来又先后兴建了许多大型灌区,如甘肃河西走廊的石羊河、黑河及新疆塔里盆地的内陆河灌区,陕西关中平原的宝鸡峡灌区、泾惠渠灌区,银川平原的引黄灌区及内蒙河套灌区等,这些灌区已成为西北地区重要的粮棉油生产基地和生态环境屏障。据有关资料统计^[3-4],该区有大型灌区97处,约占全国的21.3%,灌溉面积达1 097万hm²,粮食

收稿日期:2019-08-09

修稿日期:2019-09-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51409219);陕西水利科技计划项目(2011SLKJ-7);水利部公益性行业科研专项项目(201301016)

作者简介:魏晓妹(1957—),女,甘肃甘谷人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事水资源转化理论与调控技术方向的教学与科研工作。

E-mail: weixiaomei@nwfau.edu.cn

总产量 4 759 万 t。西北大型灌区的运行与发展,为保障我国粮食安全、维护区域良好生态环境及促进社会经济可持续发展起到了极其重要的支撑作用。

地下水是西北地区水资源的重要组成部分,相对于地表水而言,地下水资源分布广泛,可就地利用,其不仅是地表水灌溉的重要补充水源,同时还是生态环境控制因子,地下水的开发利用为西北地区灌溉农业发展提供了重要的水源,也在保障粮食安全和生态环境安全等方面发挥了重要的作用。然而,近几十年来,受变化环境的影响,西北大型灌区面临着水资源供需矛盾突出,灌溉保证率偏低,渠井用水比例失调,地下水调蓄能力削弱,内陆河下游灌区地下水严重超采,生态环境恶化等问题,严重影响着灌区的可持续发展。为此,许多国内外学者及专家围绕这些问题开展了大量卓有成效的研究工作,也取得了许多可喜的研究成果。在变化环境的大背景下,梳理、归纳、总结灌区相关主要研究工作及其进展,展望未来发展趋势,对西北灌区地下水资源的可持续利用具有重要的科学意义。

1 地下水开发利用与西北灌区的可持续发展

在气候变化和人类活动加剧的大背景下,深入认识灌区地下水的特征及功能,重新审视合理利用地下水资源对西北灌区高效安全用水及可持续发展的支撑作用也显得十分必要。

1.1 西北灌区地下水的特征及功能

1.1.1 灌区地下水的特征

西北大型灌区一般位于平原区或盆地区,如关中平原、宁夏平原、河西走廊及塔里木盆地等,这些区域堆积着大量巨厚的松散物质,地表径流相对集中,为地下水补给及储存创造了有利条件,西北地区地下水资源量占全国的 13.0%,而且主要分布在平原及盆地^[5]。归纳已有研究成果^[6-9],认为西北灌区地下水的主要特征有:

(1)分布广泛性。地表水的分布一般局限于有限的水文网范围,而地下水的分布虽然受自然地理和水文地质条件的制约,有一定的时空变异性,但相比地表水而言,其地域分布比较广泛,是一种分布在“面”上的水资源,可分散开采和就地利用。

(2)可恢复性。受气候变化、灌溉及开采等因素的影响,灌区地下水动态在不断发生变化。从年内看,夏灌期主要为开采期,消耗地下水,冬灌和春灌期地下水得到补给;年际之间,枯水年份地下水消

耗往往大于补给,而丰水年份的降水及渠水的入渗补给不仅可以满足当年消耗的需要,而且还可弥补枯水年份亏缺的水量。因此,灌区地下水是可以得到不断补充和更新的资源,具有可恢复性。

(3)水量、水质的稳定性。地下水与地表水相比,由于其埋藏于地下,受气候变化和人为活动的影响较小,水质比较洁净、水量也比较稳定,供水保证程度较高;尤其是在包气带的保护作用下,地下水不易受到污染,水质一般较好,不仅是人畜供水的理想水源,同时也是灌区实施节水灌溉的优质水源。

1.1.2 灌区地下水的调蓄功能

西北灌区所在平原区或盆地区,一般地形平坦、含水层分布广泛,地下径流微弱,浅层地下含水层类似于一个巨大的“地下水库”,对降水、渠系渗漏及田间灌溉入渗补给水流具有一定的滞缓、调蓄和再分配作用,地下水的调蓄功能是地下水系统的自然属性,是水在含水层孔隙中输入、运移、储存和输出的过程和能力。地下水的调蓄功能允许灌区在地下水开发利用中“丰储枯用、以丰补歉”,既弥补灌区干旱季节地表水源的不足、满足灌区作物需水要求,又改善地下水的循环条件,使地下水得到有效涵养,为灌区储备了重要的应急或抗旱灌溉水源。陕西黄土塬灌区三水转化机理与水资源最佳调控模式研究结果表明,黄土地区由于灌溉水的渗漏能够形成巨大的地下水库,如能有计划地实施水资源的地下调蓄,则可有效缓解该区既干旱缺水又涝碱成灾的矛盾局面。由此可见,地下水的基本特征构成了其成为西北渠井结合灌溉水源的基本条件,而地下水的调蓄功能则决定着其对灌区高效安全用水的保障作用。

1.2 地下水开发利用对灌区可持续发展的作用

1.2.1 弥补地表水资源不足、提高灌区供水保证率

大型灌区是西北地区粮、棉、油和经济作物的主要产区,地表水不能完全满足作物的需水要求,开采地下水灌溉,既能够弥补枯水年份和干旱季节地表水源的不足,满足作物需水要求,又能充分利用地下水的调蓄功能,将地表水灌溉中的渠道及田间灌溉渗漏补给量重复利用,提高了灌溉水的利用效率。同时,井灌井排也降低了地下水位,可以腾出地下水调蓄空间,增加降水入渗补给量,提高了灌区的供水保证率。如陕西泾惠渠灌区,20 世纪 70 年代~80 年代初曾实行过冬灌期单一渠灌、春灌期渠井汇流或渠井间灌、夏灌期群井汇流或井渠汇流的渠井结合配水模式,保障了灌区农作物的需水要求,获得了

良好的经济效益。

1.2.2 合理调控地下水位、防治土壤次生盐碱化

西北灌区大多数位于干旱半干旱地区,该区降水量小、蒸发量大,土壤和地下水中含可溶盐分较多,单一引地表水灌溉会抬高地下水位,存在土壤盐渍化的潜在威胁,打井开采地下水灌溉,利用“井灌井排”的作用,可以有效调控灌区地下水位,防治灌区渍涝盐碱灾害,促进灌区生态环境的良性循环。如宁蒙河套灌区、甘肃引黄灌区、陕西泾惠渠及宝鸡峡灌区都曾不同程度地出现过土壤次生盐渍化问题,都是通过打井开采浅层地下水或结合水平排水的方式,合理调控了地下水位,使土壤盐碱、渍、涝灾害得到了有效治理,保障了灌区农田生态环境安全。

1.2.3 地下水开发利用、促进区域经济发展

对西北地区来说,大型灌区是一个包含社会、环境及灌溉区域内所有活动的集合体。现代意义上的大型灌区,不仅仅涉及农村、农业和农民的发展问题,而且也涉及到所辖区域和辐射区域的经济、社会和谐稳定及良好生态环境维护等问题^[10]。地下水作为水资源的重要组成部分,由于地下水的开发利用,既提高了灌溉供水保证率,也给良种推广、增施肥料,种植结构调整及发展经济作物创造了稳定的水源条件,为灌区农业增产、农民增收和乡村振兴提供了基础保障,促进了区域经济的可持续发展。

2 西北灌区地下水资源开发利用研究进展

西北大型灌区地下水开发利用历史悠久,灌区地下水开发利用的理论及技术问题研究领域比较广泛。鉴于在变化环境的大背景下,西北大型灌区普遍出现了河源来水量减少、水资源供需矛盾突出、地下水均衡失调及生态环境恶化等问题,以下主要围绕灌区地下水开发利用的共性和关键性问题分析。

2.1 变化环境下西北灌区地下水循环与演化机制

灌区是气候变化的敏感区和人类活动的密集区,气候变化、引水灌溉及地下水开采等活动极大地改变着西北灌区的地下水循环条件,也影响着灌区地下水的形成与演化机制。所以,变化环境下灌区地下水循环及演化机制问题是颇受关注的热点问题。

2.1.1 变化环境下灌区地下水循环特征

灌区地下水循环系统是一个典型的自然-人工复合系统,该系统具有开放性,与外界发生着频繁地

水量和能量交换^[11]。相关研究表明^[12-18],在变化环境因素(气候变化和人类活动的)的影响下,灌区地下水循环具有如下特征:

(1) 水循环路径及强度的变化。渠系的修建、机井开采及引水灌溉方式不仅改变着地表水转化为地下水的路径和强度,而且也改变了降水的天然分配,使径流性水资源减少,有效利用水分增加,直接影响着降水、地表水补给地下水的强度。魏晓妹等^[19]对石羊河流域绿洲农业发展对地表水与地下水转化影响的研究表明,从20世纪50年代至90年代,受流域气候变暖、河道外引水量增加及渠系水利用系数提高的影响,流域平原区地下水补给量减少45.7%;而随开采量的增加,武威盆地泉水溢出量削减达到73.5%。

(2) 地下水循环结构和参数的变化。在灌区尺度上,灌溉制度、种植结构、机井布局及开采强度、地下水位等的变化对灌区蒸散发及地下水入渗补给等产生明显的作用,同时也会影响水文及水文地质参数的变化。刘艳等^[20]基于实测资料研究了泾惠渠灌区不同包气带厚度下水文地质参数的演变问题,指出20世纪80年代中期灌区平均包气带厚度小于5 m,降水及田间灌溉入渗补给系数分别为0.22和0.30,随着渠井用水比例的失调,浅层地下水位埋深不断加大,至2001年灌区平均包气带厚度已超过了14 m,此时降水和灌溉入渗补给系数仅为包气带厚度3 m~5 m时的1/2和1/3。

(3) 地下水循环过程和方式的变化。西北大型灌区的运行及发展,在灌溉及开采活动的影响下,区域性大循环减弱而局部小循环增强;地下水循环主要以垂向水循环为主,人工水循环加强,而自然水循环减弱。宝鸡峡灌区50%频率代表年的降水、渠系及田间灌溉水的入渗补给量占总补给量的80%。

2.1.2 变化环境下灌区地下水动态演变规律及机制

变化环境下灌区地下水循环决定着地下水动态的演变规律,而地下水位动态是灌区地下水循环的“脉搏”^[21]。因此,变化环境下灌区地下水动态演变规律及机制的研究已成为农业水资源领域关注的重要方向。

灌区地下水系统是一个开放性系统,外界环境对地下水系统的信息输入(降水、渠系渗漏、田间灌溉入渗及开采等)通过在含水系统(水文地质实体)内的变换,以输出(潜水蒸发、泉水溢出等)的形式表示对系统的响应,而地下水位、水化学成分及水温的变化则是其状态变量^[22]。众多学者从不同的视

角,分别运用统计水文学及数值耦合模拟计算等方法,研究了地下水位变动对变化环境的响应及地下水位动态变化的驱动因素。张文化等^[23]运用主成分分析法,研究了武威盆地和民勤盆地地下水位对气候和人类活动因子的响应,指出流域平原区人类活动因子对地下水位埋深变化的贡献远大于气候变化因子的贡献。杜伟等^[24]、苏阅文等^[25]、徐存东等^[26]、吉磊等^[27]运用统计水文学方法和 GIS 技术,分别以陕西宝鸡峡灌区、内蒙河套灌区、甘肃景电一期灌区及新疆玛纳斯河灌区为研究对象,研究了近 30 多年来灌区地下水位动态的时空间分布特征,并识别了各灌区地下水位动态变化的主要驱动因子。李萍等^[28]基于多变量时间序列 CAR 模型建立了关中渠井双灌区地下水位动态对变化环境的响应模型,不同变化环境情景下地下水位埋深模拟结果表明,降水、蒸发、渠首引水及渠井用水比例是影响灌区地下水循环的主要外部环境因素,而降水量减少、蒸发量增加,各项补给量减少及开采量增加使灌区地下水位逐年下降,近 30 多年累计下降 11.8 m。王蕾^[29]通过构建 SWAT - MODFLOW 耦合模型,研究了变化环境下关中渠井结合灌区地下水的循环特征,通过设定未来 30 年不同的变化环境情景,模拟计算了灌区地下水流场和地下水循环要素,并提出了灌区地下水可持续利用的适应性对策。以上研究表明,变化环境对西北大型灌区地下水循环条件及演化机制产生着深远的影响,引水灌溉、种植结构调整及地下水开采等人类活动是影响灌区地下水动态变化的主要驱动因素,这些研究成果为西北灌区水资源的科学调控提供了依据。

2.2 灌区地表水与地下水的联合调控

西北大型灌区的发展历程表明,合理的地下水位对灌区高效安全用水十分重要,灌区地表水与地下水联合调控的核心是在维持灌区合理地下水位埋深的前提下,确定在引进一定地表水量的条件下所能开采的地下水量,或在开采一定地下水量的条件下应引入的地表水量^[30]。因此,以地下水位或埋深为控制目标,探索研究灌区地表水与地下水联合调控问题也是实行最严格水资源管理制度的主要研究内容。

2.2.1 灌区合理地下水位以及控制标准

地下水位是灌区地下水循环的“脉搏”,也是衡量其循环健康与否的重要标志。因此,如何将灌区地下水位调控在合理的范围内一直是农业水资源领域关注的热点问题。国内外学者从不同的角度提出

了一系列合理地下水位埋深的概念,旨在以此寻求适合灌区地下水位调控的最适标准。

灌区合理地下水位埋深问题的研究,国外研究主要为前苏联学者基于地下水位埋深与土壤层生盐碱化及植物生长状况的关系分析,通过田间试验或模型研究的方法,提出了不同区域理想的地下水位埋深区间。在国内,西北灌区合理地下水位埋深的研究主要围绕灌区地下水采补失调、补排失调而引发的一系列生态环境问题而展开。首先是明确了灌区合理地下水位埋深确定的基本原则^[31-35],在此基础上,从不同角度提出了灌区合理地下水位埋深的概念,进而探究了合理地下水位埋深控制标准或控制性地下水位埋深及其确定问题。张惠昌^[36]针对河西走廊灌区由地下水位下降引发的生态环境退化的问题,提出了“地下水生态平衡埋深”的概念,并强调指出此埋深不是一个绝对的数值,而是一个存在上、下限区间值的水位变动带。钟瑞森等^[37]结合西北内陆干旱灌区土壤次生盐渍化问题,运用区域水盐平衡模型,通过设置不同的水资源利用方案,模拟研究了新疆阿瓦提灌区地下水位调控措施及效应。闫金良等^[38]从水盐平衡的视角,阐述了内蒙河套灌区适宜地下水位的研究现状,指出了存在的不足。董起广等^[39]针对陕西泾惠渠灌区存在的地下水采补失调问题,提出了地下水生态水位埋深的上、下限值。赵孟哲等^[40]从灌区地下水“双控”管理的理念出发,探究了灌区控制性关键地下水埋深的概念,计算确定了泾惠渠灌区不同水文地质分区合理地下水位埋深的上下限阈值。由以上分析可见,西北灌区合理地下水位埋深及控制标准问题的研究,大多是针对不同灌区所面临的与地下水埋深有关的生态环境及地下水补给问题,探索性地提出了灌区地下水合理埋深控制阈值及确定方法,这些研究深化了对地下水位管理重要性的认知,也为灌区地表水与地下水联合调控提供了依据。

2.2.2 灌区地表水与地下水联合调控

西北灌区地表水与地下水的联合调控是通过渠井结合灌溉实现的。近年来满足地下水位埋深控制要求的灌区合理渠井用水比例和地表水与地下水合理配置方案研究是西北大型灌区水资源联合调控的重要研究内容。魏晓妹^[41]在黄土塬灌区地下水动态机理田间综合试验的基础上,充分考虑降水、灌溉、开采对地下水位动态的综合影响,建立及求解了基于机井开采 - 地下水位恢复互馈动态过程的灌区地下水流数学模型,为灌区地表水与地下水联合调

控提供了新方法。周维博等^[42]运用多元非线性地下水动态预报模型,通过对不同渠井用水比例条件下地下水位动态的模拟计算,得出了平水年和枯水年采补平衡所对应的适宜渠井用水比例。李萍等^[28]基于多变量时间序列 CAR 建立的灌区地下水动态对变化环境的响应模型,对不同降水情景及渠井供水方案组合下的地下水位动态进行了模拟计算,以多年补排平衡为判断准则,提出不同降水情景下泾惠渠灌区的合理渠井供水比例。代锋刚等^[43]依据灌区农业节水方案,运用地下水数值模拟模型,通过调控源、汇项,模拟计算了泾惠渠灌区适宜的渠井用水比例。粟晓玲等^[44]针对泾惠渠灌区地下水采补失调的问题,运用水资源优化配置模型与地下水数值模型相结合方法,确定了以灌区缺水量最小、又能基本实现了多年采补平衡的地表水与地下水的配置方案。贺向丽等^[45]基于石羊河下游红崖山灌区实施“关井压田”的治理策略,设置了若干调控方案,利用构建的地下水数值模型对各种调控方案下未来 20 年内的地下水动态变化进行了模拟计算,得到了合理的地下水限采方案。由此可见,西北灌区地表水与地下水的联合调控的目标更加明确,切中灌区所面临的关键地下水问题,并注重新技术和新方法的引入,研究成果更具有应用价值。

2.3 灌区地下水开采模式及机井合理布局

2.3.1 灌区地下水开采模式

地下水资源评价及开采模式研究是机井合理布局的前提和基础。20 世纪 70 年代—80 年代,以灌区地下水资源评价为基础的地下水开采模式问题研究较多,而近几十年来年来大多数灌区尚未进行过系统性的地下水资源评价工作,也使西北灌区地下水开采模式问题的研究有所弱化,但在运用新技术方面也取得了进展。降亚楠^[46]将区域地下水资源评价方法与 GIS 技术结合,研发了基于 GIS 的灌区地下水资源综合评价系统,运用该系统实现了对宝鸡峡灌区地下水资源数量、质量及开发利用潜力的评价。李彦刚^[47]以宝鸡峡灌区地下水资源评价为基础,以开采系数为依据,划分了灌区地下水开发利用类型区,提出了各类型区地下水资源可持续开发利用的模式。王水献^[48]运用地下水数值模拟方法,考虑供水约束条件,确定了新疆阿瓦提绿洲灌区地下水的合理开采模式。杨路华等^[49]基于内蒙古河套灌区地下水开发利用原则,提出了地下水插花式开采形式,通过地下水均衡要素关系的分析,确定了合理的地下水开采量。由此可见,近些年的相关研

究更多关注的是将新技术、新方法引入地下水开采模式的研究。

2.3.2 灌区机井合理布局

近些年国外有关灌区机井布局问题的研究进展报道较少,而国内因地下水位动态失调而引发的生态环境问题,灌区机井合理布局的问题受到广泛关注,井流理论和井群布局方法的研究也取得了可喜的进展。灌区机井布局以井流理论为基础,李佩成^[50]基于西北灌区井灌井排的渗流特性,提出了“割离井”的概念,并构建了系列非稳定井流模型,推导了相应的解析解,研究了基于稳定流和非稳定流理论的井群布局设计方法。魏晓妹等^[51]根据“割离井”理论,提出了根据非稳定流抽水试验资料确定灌区水文地质参数的图解方法。近年来关于灌区机井布局方法的研究相对于国外也比较多,并随着信息技术及计算机技术的发展而不断发展。郭西万^[52]运用响应函数法使数学模拟模型和优化模型相耦合,对新疆泽普水源地进行了井群优化布局的研究;王红雨等^[53]在考虑井间抽水干扰情况下,利用线性规划的方法研究了宁夏井灌区规划中最佳井距的确定;王康等^[54]以内蒙河套灌区为研究对象,利用 MODFLOW 软件对设定地下水开采强度条件下的不同布井方案进行了地下水动态模拟,探讨了灌区不同区域的机井布局形式;李彦刚等^[55]在用传统方法确定宝鸡峡灌区不同开采类型区机井数量的基础上,以灌区井数为决策变量、灌溉费用最小为目标函数,用遗传算法求解了各类型区的井数,并提出了灌区机井布局调整策略。刘鑫等^[56]充分考虑灌区地下水资源承载力和生态环境需水要求,建立了地下水流运动模型和机井优化布局模型,对石羊河下游红崖山灌区机井空间布局的适宜性进行了评价。以上研究可见,西北灌区机井布局理论研究更具有针对性,布局方法已从传统的常规方法向智能模拟优化技术发展,研究内容已从确定井数、井距及单井灌溉面积向机井空间布局适宜性评价及灌区机井布局调整策略等方面扩展,研究方法和内容在不断发展和深化。

2.4 灌区地下水的管理机制

地下水是西北灌区重要的灌溉水源,同时也是生态环境演化的重要控制因子。近几十年大型灌区普遍存在的地表水与地下水管理分离、渠井灌水价差明显,地下水监测网络体系不健全等问题也引起了广大研究者的广泛关注,并陆续开展了相关工作。

2.4.1 灌区地下水行政及政策管理问题

灌区地表水与地下水同处于灌区水文循环之中,相互补充、相互依存,而灌区只有权经营管理地表水,灌区内的地下水却由所辖县(区)水行政主管部门管理。针对灌区地表水与地下水管理分离、渠井灌水量异价的问题,一些研究者从政策、行政及经济层面研究地下水管理机制问题。杨晓茹^[57]针对陕西渭河流域大中型灌区存在的地下水无序开采问题,提出要实现水资源的良性循环必须解决好地表水与地下水的统一管理问题。廖永松等^[58]通过对泾惠渠灌区地下水管理制度及现状的调查,构建了基于公共产权属性的地下水利用理论模型,解释了地下水过度开采的原因,对井渠结合灌区从地表水与地下水统一规划、调整水价结构方面提出了管理对策。胡中锋^[59]针对宝鸡峡灌区灌溉用水效益衰减问题,提出了深化灌区改革、建立新型农灌体制、制定科学用水计划等对策。景清华^[60]通过对宁夏引黄灌区用水机制的调查,提出实行渠井异水同价的建议,以引导灌区群众合理开发利用地下水。党永仁等^[61]、闫雪艳^[62]先后研究了泾惠渠灌区“井进渠退”的问题,认为大力改进管理体制、实行“两水统管”是解决灌区地下水采补失衡问题的重要措施。李鹏等^[63]针对关中灌区存在的地下水盲目开采问题,建议制定和出台有关灌区地下水资源管理和保护的相关法律法规,以便通过法律手段规范地下水开发、利用及管理行为。

2.4.2 灌区地下水“双控”管理机制及技术问题

2012年《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》中明确指出“实行地下水取用水总量控制和水位控制”(以下简称“双控”),有关灌区地下水“双控”管理的问题也引起了各方面的高度关注,主要工作聚焦在“双控”管理机制及技术研究方面。李佩成^[64]从地下水对保障国家安全战略储备资源的高度,阐述了实行最严格地下水资源管理的迫切性和必要性。张远东等^[65]、王小军等^[66]、耿直等^[67]阐述了地下水“双控”管理的内涵以及取水总量与水位之间的关系,分析了粮食主产区地下水管理现状及存在的问题,提出了地下水严格管理的针对性措施。闫丽娟^[68]结合石羊河流域地下水管理实践,提出以地下水含水系统为管理单元、耦合流域及行政区管理目标的灌区地下水可持续管理制度框架。赵孟哲^[69]以控制性地下水埋深为管理依据,计算了泾惠渠灌区年均地下水埋深管理变幅指标,运用多变量时间序列模型模拟确定了灌区丰、平、枯三种降

水情景下地下水协同管理方案。康艳等^[70]针对西北渠井结合灌区面临的地下水问题,认为建立总量控制与定额管理相结合的灌溉用水制度,可以有效促进灌区地表水与地下水的联合调控。“双控”管理的技术主要是围绕开采量及水位计量与控制技术展开。赵辉等^[71]利用计算机技术、遥控遥测技术和通讯技术研发了井灌区地下水限量开采自动控制系统,为有效控制地下水超开采提供了技术支持。李亚民等^[72]以数学模型为基础,采用计算机技术、遥控遥测技术及通讯技术,研发了井灌区水资源管理的遥测遥控系统,有效地控制了地下水的开采。石羊河流域针对地下水超采问题,督促地方政府编制水量分配方案和地下水开采削减量计划,严格落实控制指标和削减目标,要求流域内机井必须有计量设施、有取水许可证及水权,并利用IC卡、代码卡及TM卡对地下水实行计量管理,为实现“双控”管理提供了技术手段^[73]。

3 西北灌区地下水资源开发利用发展趋势

西北大型灌区地下水开发利用的理论与技术研究取得了显著的进展,但随着研究工作的不断深入,灌区地下水问题研究的复杂性也日益显现,一些机理性的基础研究还比较薄弱,已有理论与方法也存在一定的局限性,影响着灌区地下水资源的可持续利用。结合西北灌区面临的主要地下水的问题,并借鉴国内外相关研究进展,认为以下几个方面将是未来西北灌区地下水开发利用科技研究工作的重要方向。

3.1 变化环境下灌区地下水形成与演化机制的基础研究

我国从20世纪50年代—80年代,针对农业灌溉而开展的“农业水文地质调查”为认识灌区地下水的形成条件及赋存规律提供了科学依据。然而近些年来,灌区地下水循环规律及演化机制的研究有过于重视模型模拟的倾向,而常常忽视了对灌区水文地质条件的准确认知与了解,使地下水形成与演化机制的研究难以取得突破性的进展^[74]。因此,亟待加强灌区水文地质勘查或调查,开展灌区地下水循环过程的野外与室内试验工作^[75],以获取关键原始数据,这是未来地下水循环研究的重要基础性工作。在此基础上,构建气候—陆地水文—地下水转化耦合模型,定量模拟灌区地下水文过程,深化对灌区降水、地表水、土壤水与地下水之间转化关系的系

统认识,揭示灌区变化环境下地下水循环机制及演化规律,也是未来的发展趋势。

3.2 基于高效安全用水的灌区地表水与地下水联合调控研究

合理地下水埋深对灌区高效安全用水十分重要,但由于西北灌区水文地质条件的复杂性,目前相关研究仍处于探索研究阶段,因此需要从生态水文地质学及水资源学的视角,进一步完善灌区各种控制性关键地下水位的概念,并探讨具有普适性的定量研究方法。渠井结合灌溉是西北灌区可发展的方向,运用地表水与地下水耦合技术研究灌区水源调控问题是行之有效的方法^[76],而地下水数值模型作为耦合模型的重要组成部分,人们却往往忽视了对水文地质概念模型的研究,增加了模型模拟的随机性和不确定性,因此,严谨的模型结构、参数及各种输入数据的准确性研究也是未来的关键问题^[77-78]。同时,明确不同类型灌区高效安全用水的目标,研发基于3S技术的灌区地表水与地下水联合调控耦合模型或灌区地下水管理模型^[79],提出实用、可行的地表水与地下水调控方案将是西北灌区地下水可持续发展利用研究的发展趋势。

3.3 渠井结合灌区机井布局理论与方法的研究

灌区地下水资源评价与开采模式研究是机井合理布局的基础,然而近些年来这方面的工作有所弱化,灌区地下水资源的家底不清,使机井布局缺乏科学规划,因此,变化环境下灌区尺度地下水资源评价及开采模式研究问题必将引起重视。另外,拟开发的纯井灌区机井布局的理论与方法研究比较成熟^[80],而对于已成渠井结合灌区的研究相对较少,因此基于地表水与地下水联合应用机制的灌区机井合理布局理论与方法仍然是西北灌区关注的重点问题,而将大数据、5G及人工智能技术应用于灌区机井规划与布局的研究也是未来的发展方向^[81-82]。同时也应该结合灌区的作物种植结构及需水特点,加强不同类型灌区渠井结合方式与工程布置的研究,使灌区渠系与井网的布局更加合理,为灌区实现“以井补渠、以渠养井、渠井结合”的灌溉模式提供基础条件支撑^[83]。

3.4 灌区地下水“双控”管理能力建设

灌区地下水“双控”管理是最严格水资源管理制度研究的重要内容,也是西北灌区解决地下水问题有效方法^[84]。灌区地下水取水总量与水位控制指标的研究还处于起步阶段,研究灌区取水总量与地下水位之间的关系,运用先进、可行的方法,科学

地确定不同开发利用类型区总量与水位控制指标将是灌区实施地下水“双控”管理的关键研究问题^[85-86]。另外,西北灌区现有地下水监测及基础数据现状难以满足“双控”管理及地下水科学研究工作的需求,因此完善和优化灌区地下水监测网站建设、加强地下水监测新技术及监测数据共享系统的研究也是灌区地下水管理能力建设的重要内容,需要从软、硬件等诸多方面进行研究。同时,也需要研究、出台有关灌区地下水资源管理和保护的相关法律、法规及制度,通过法律、政策及行政管理措施促进灌区地下水的“双控”管理。

4 结论

围绕西北灌区共性关键地下水问题而展开的科学研究工作取得了丰硕的成果,在归纳总结地下水开发利用科学及技术研究进展的同时,针对相关研究中存在的局限性和不足,探讨了未来的发展趋势。

(1) 归纳分析了西北灌区地下水的特征及调蓄功能,指出地下水的基本特征构成了地下水成为渠井结合灌溉水源的基本条件,而地下水的调蓄功能则决定着其对灌区高效安全用水的保障作用,进一步明晰了地下水资源开发利用对西北灌区可持续发展的重要性。

(2) 变化环境对西北灌区地下水循环条件及演化机制产生着深远的影响。运用统计水文学及数值耦合模拟等方法,展开了灌区地下水位动对变化环境响应及驱动因素等方面的研究,揭示了变化环境下灌区地下水形成及演化机理。指出加强灌区水文地质调查和地下水循环过程的试验研究,是未来地下水循环机理研究的重要基础;研发气候-陆地水文-地下水转化耦合模型,定量模拟研究灌区地下水文过程是今后的发展趋势。

(3) 明晰了灌区合理地下水埋深的概念及确定原则,探究了西北不同典型灌区合理地下水埋深的确定方法,灌区地表水与地下水联合调控的理论与技术研究也在不断深化。提出明确灌区高效安全用水的目标,研发地表水与地下水联合调控耦合模型,研究实用可行的地表水与地下水调控方案将是灌区地下水可持续利用研究的热点问题。

(4) 灌区地下水开采模式研究更聚焦于将新技术、新方法引入相关研究,而机井布局理论研究更具有针对性,布局方法已从传统方法向智能模拟优化技术发展,布局内容已从确定井数、井距及单井灌溉

面积向机井空间布局适宜性评价及布局调整策略等方面扩展。认为基于地表水与地下水联合应用机制的灌区机井合理布局理论与方法研究仍然是西北灌区关注的重点问题,而将信息技术与计算机技术应用于灌区机井规划与布局研究将是未来发展的方向。

(5) 归纳分析了灌区地下水行政及政策管理、“双控”管理机制及技术问题,认为科学确定不同地下水开发利用类型区总量与水位控制指标将是实施灌区地下水“双控”管理的关键研究问题,而完善和优化灌区地下水监测网站建设、强化地下水监测新技术及监测数据共享系统的研发将是未来灌区地下水管理能力建设的重要内容。

参考文献:

- [1] 钱正英,沈国舫,潘家铮. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 沈振荣,苏人群. 中国农业水危机对策研究[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [3] 张翔,张青峰. 不同粮食消费模式下西北旱区大型灌区耕地压力分析[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(1):244--251
- [4] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报,2018,73(7):1189-1203.
- [5] 赵文昌. 中国西北地区地下水资源[M]. 北京:地震出版社,2002.
- [6] 魏晓妹. 地下水资源的管理与保护[J]. 地下水,2013,35(2):14.
- [7] 李佩成,刘俊民,魏晓妹,等. 黄土塬灌区三水转化机理及水资源最佳调控模式研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1999.
- [8] 周维博,李佩成. 农田灌溉中节水与养水的哲理思考[J]. 西北水资源与水工程,1999(4):17-20.
- [9] 费宏宇,崔广柏. 地下人工调蓄研究进展与问题[J]. 水文,2006,26(4):10-14.
- [10] 杨大文,楠田哲也. 水资源综合评价模型及其在黄河流域的应用[M]. 北京:中国水利电力出版社,2005.
- [11] 刘昌明,任鸿遵. 水量转化实验与计算分析[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [12] 李建承. 北方大型灌区渠井结合配置模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [13] 刘艳,朱红艳. 泾惠渠灌区水环境劣变特征及地下水调蓄能力分析[J]. 农业工程学报,2011,27(6):19-24.
- [14] 黄修桥,郭圆圆,徐建新. 灌区水资源循环转化研究进展[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(1):79-82.
- [15] 杨志勇,胡勇,袁喆,等. 井灌区水循环研究进展[J]. 灌溉排水学报,2015,34(3):56-60.
- [16] 代俊峰,崔远来. 灌溉水文学及其研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(2):294-300.
- [17] 黄修桥,郭圆圆,徐建新. 灌区水资源循环转化研究进展[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(1):79-82.
- [18] Wang Xiaojun, Zhang Jianyun, He Ruimin, et al. A strategy to deal with water crisis under climate change for mainstream in the middle reaches of Yellow River [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2011,16(5):555-566.
- [19] 魏晓妹,康绍忠,粟晓玲,等. 石羊河流域绿洲农业发展对地表水与地下水转化关系的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(5):38-41.
- [20] 刘燕. 泾惠渠灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J]. 人民长江,2010,41(8):100-103.
- [21] 魏晓妹. 地下水在灌区“四水”转化中的作用[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(3):54-57.
- [22] 张永波. 水工环研究的现状与趋势[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [23] 张文化,魏晓妹,李彦刚. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响[J]. 水土保持研究,2009,16(1):183-187.
- [24] 杜伟,魏晓妹,李萍,等. 变化环境下灌区地下水动态演变趋势及驱动因素[J]. 灌排工程机械学报,2013,31(11):993-999.
- [25] 苏阅文,冯绍远,王娟,等. 内蒙古河套灌区地下水位埋深分布规律及其影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2017(7):33-37.
- [26] 徐存东,王荣荣,丁廉营,等. 干旱引黄灌区地下水位变化特征分析[J]. 人民黄河,2016,38(5):54-57.
- [27] 吉磊,刘兵,何新林,等. 玛纳斯河下游灌区地下水埋深变化特征及成因分析[J]. 灌溉排水学报,2015,34(9):59-65.
- [28] 李萍,魏晓妹,降亚楠,等. 关中平原渠井双灌区地下水循环对环境变化的响应[J]. 农业工程学报,2014,30(18):123-131.
- [29] 王蕾. 基于 SWAT-MODFLOW 的变化环境下渠井结合灌区地下水循环特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [30] 邵东国,刘武艺,张湘隆. 灌区水资源高效利用调控理论与技术研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(5):251-257
- [31] Manzione R L, Wendland E, Tanikawa D H. Stochastic

- simulation of time-series models combined with geostatistics to predict water-table scenarios in a Guarani Aquifer System outcrop area, Brazil [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(7): 1239-1249.
- [32] 李和平, 史海滨, 苗 澍, 等. 生态地下水研究进展和管理阈值指标体系框架[J]. *中国农村水利水电*, 2008(11): 8-11
- [33] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. *水文地质工程地质*, 2003(3): 6-9
- [34] Sophocleous, Marios. Managing water resources systems: why "Safe Yield" is not sustainable[J]. *Ground Water*, 2005, 35(4): 561-561.
- [35] 唐克旺, 侯 杰, 于丽丽. 基于功能的地下水控制水位确定方法[J]. *中国水利*, 2015(9): 30-32
- [36] 张惠昌. 干旱区地下水生态平衡埋深[J]. *勘察科学技术*, 1992(6): 9-13.
- [37] 钟瑞森, 郝丽娜, 包安明, 等. 干旱内陆河灌区地下水位调控措施及其效应[J]. *水利发电学报*, 2012, 31(4): 65-71
- [38] 闫金良, 张金艳, 张 敏. 内蒙古河套灌区适宜地下水水位研究进展[J]. *内蒙古水利*, 2015, 155(15): 10-11.
- [39] 董起广, 周维博. 泾惠渠灌区地下水生态水位研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S1): 70-73.
- [40] 赵孟哲, 魏晓妹, 降亚楠, 等. 渠井结合灌区控制性关键地下水位及其管理策略研究[J]. *节水灌溉*, 2015(7): 95-98.
- [41] 魏晓妹. 黄土塬灌区地下水水位动态机理及其调控模型的研究[D]. 杨凌: 西北农业大学, 1996.
- [42] 周维博, 曾发琛. 渠井结合灌区地下水动态预报及适宜渠井用水比例分析[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(1): 6-9.
- [43] 代锋刚, 蔡焕杰, 刘晓明, 等. 利用地下水模型模拟分析灌区适宜井渠灌用水比例[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 45-51.
- [44] 栗晓玲, 宋 悦, 刘俊民, 等. 耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置研究[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 43-51.
- [45] 贺向丽, 叶 懋, 张 昕, 等. 基于调控适宜性区域评价的红崖山灌区地下水位动态预测[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 179-186.
- [46] 降亚楠. 基于 GIS 的灌区地下水资源评价系统[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [47] 李彦刚. 灌区机井合理布局理论与方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [48] 王水献. 新疆阿瓦提绿洲灌区约束供水条件下地下水开采模式[J]. *工程勘察*, 2010, 38(3): 46-49, 60.
- [49] 杨路华, 沈荣开, 曹秀玲. 内蒙古河套灌区地下水合理利用的方案分析[J]. *农业工程学报*, 2003(5): 56-59.
- [50] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析解[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [51] 魏晓妹, 李佩成. 利用“隔离井法”公式确定水文地质参数的图解方法[J]. *地下水*, 1993, 13(4): 141-143.
- [52] 郭西万. 井群规划的系统工程法——以新疆泽普县水源地规划为例[J]. *八一农学院学报*, 1991, 17(1): 33-37.
- [53] 王红雨, 全达人. 井灌区规划中最佳井距的确定方法[J]. *宁夏农学院学报*, 1995, 13(3): 27-32.
- [54] 王 康, 沈荣开, 周祖昊. 内蒙古河套灌区地下水开发利用模式的实例研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 29-32.
- [55] 李彦刚, 魏晓妹, 蔡明科. 基于供需水量平衡分析的灌区机井合理布局模式[J]. *排灌机械工程学报*, 2012(5): 614-619.
- [56] 刘 鑫, 王素芬, 郝新梅. 红崖山灌区机井空间布局适宜性评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 9(2): 101-109.
- [57] 杨晓茹. 渭河流域大中灌区水资源开发利用存在问题及对策[J]. *陕西水利*, 2002(4): 24-25.
- [58] 廖永松, 魏 卓, 鲍子云, 等. 地下水管理制度、现状与后果[J]. *水利发展研究*, 2005(6): 37-41.
- [59] 胡中锋. 宝鸡峡灌区农灌用水效益衰减原因分析与对策[J]. *陕西水利*, 2009(2): 56-57.
- [60] 景华清. 井渠结合灌溉管理模式探讨[J]. *中国农村水利水电*, 2010(2): 90-92.
- [61] 党永仁, 葛社民, 董冬星, 等. 渠井双灌区水资源管理途径的探讨[J]. *防渗技术*, 2001(2): 42-45.
- [62] 闫雪艳. 泾惠渠灌区地表水与地下水统一管理问题探讨[J]. *陕西水利*, 2012(5): 37-38.
- [63] 李 鹏, 魏晓妹, 杜 伟, 等. 基于高效安全用水的渠井结合灌溉管理模式研究[J]. *节水灌溉*, 2013(10): 49-51.
- [64] 李佩成. 论实行最严格水资源管理[J]. *地下水*, 2012(3): 1-5.
- [65] 王小军, 毕守海, 高 娟, 等. 严格地下水保护与管理的思考[J]. *中国水利*, 2013(11): 7-9.
- [66] 张远东, 王 策. 地下水取用水量与水位双重控制刍议[J]. *中国水利*, 2014(9): 7-9.
- [67] 耿 直, 刘心爱, 王小军, 等. 我国粮食主产区地下水管理现状及保护措施研究[J]. *中国水利*, 2009(15): 37-38.
- [68] 闫丽娟. 灌区地下水资源管理制度理论及实践研究

- [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [69] 赵孟哲. 基于开采总量及水位控制的灌区地下水协同管理模式研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [70] 康艳, 粟晓玲, 党永仁. 渠井双灌区水资源统一调控的管理机制研究[J]. 节水灌溉, 2016(7): 52-59
- [71] 赵辉, 齐学斌, 高胜国. 井灌区地下水限量开采自动控制系统的研制与应用[J]. 农业工程学报, 2001(5): 32-34.
- [72] 李亚民, 赵辉, 邵景力, 等. 井灌区灌溉管理无线遥控遥测系统的研制与应用[J]. 水利水电技术, 2004(2): 54-56, 95.
- [73] 方良斌, 唐克旺. 石羊河流域地下水管理措施与实例分析[J]. 中国水利, 2018(9): 20-22.
- [74] 中国地下水科学战略研究小组著. 中国地下水科学的机遇与挑战[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [75] 林学钰, 廖资生, 赵永胜, 等. 现代水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [76] 汪林, 董增川, 唐克旺, 等. 变化环境下海河流域地下水响应及调控模式研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [77] 胡立堂, 王忠静, 田伟. 内陆河灌区地下水和地下水集成模型与应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [78] Urbano L, Waldron B, Dan L, et al. Groundwater-surface water interactions at the transition of an aquifer from unconfined to confined [J]. Journal of Hydrology, 2006, 321(1/4): 200-212.
- [79] 齐学斌, 樊向阳. 北方典型灌区水资源调控与高效利用技术模式研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [80] 机井技术规范: SL 256—2000[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [81] 张嘉星, 齐学斌, 乔冬梅. 农业灌区机井规划布局研究进展[J]. 农学学报, 2016, 6(2): 96-100.
- [82] Shen C. A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists [J]. Water Resources Research 2018, 54(11): 8558-8593.
- [83] 魏晓妹, 赵颖娣. 关中灌区农业水资源调控问题研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 18(3): 117-121.
- [84] 魏晓妹, 降亚楠, 赵孟哲, 等. 变化环境下北方渠井结合灌区地下水调蓄与管理问题研究[C]//陈兴伟, 等. 变化环境下的水科学与防灾减灾, 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 203-207
- [85] 崔远征, 王金生, 滕艳国, 等. 地下水取水总量控制管理技术研究[J]. 中国水利, 2011(11): 26-27.
- [86] 陶洁, 左其亭, 薛会露, 等. 最严格水资源管理制度“三条红线”控制指标及确定方法[J]. 节水灌溉, 2012(4): 64-67.

特邀作者简介

魏晓妹, 女, 甘肃甘谷人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源转化理论与调控技术方向的教学与科研工作。曾任西北农林科技大学水建学院副院长, 教育部高校水利类专业教指委水文与水资源工程专业建设指导组成员, 中国农业工程学会农业水土工程专业委员会委员, 政协陕西省第八、九、十届常委。现任《地下水》和《水资源与水工程学报》编委, 西北农林科技大学老科学技术教育工作者协会工程、教育分会会长, 校本科教学督导组组组长。主要讲授研究生《水资源评价》、《水资源调控技术》、《渗流原理》及本科生《地下水动力学》、《地下水利用工程》等多门课程, 主持完成精品课程建设 1 门, 指导硕、博士研究生 40 多名。先后获得学校“青年教师教学质量评估优秀奖”、“教书育人先进个人”、“优秀教学成果二等奖”、陕西省“水利教育先进教育工作者”、中国水利教育协会“水利教育优秀研究成果三等奖”等奖励。完成国家自然科学基金、科技支持计划、水利部公益性行业专项、高校博士点基金及省水利科技项目等研究项目 10 余项。发表学术论文 60 多篇、出版专著 4 本、全国统编教材 1 本, 获批计算机软件著作权 2 项, 获陕西省科学技术二等奖 1 项、陕西省水利科技进步一等奖 1 项。