

河北省地下水压采政策下水价机制调控冬小麦灌水量研究

闫宗正^{1,2}, 房琴^{1,2}, 路杨^{1,2}, 梁硕硕^{1,2}, 张喜英^{1*}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中科院农业水资源重点实验室/
河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:河北平原长期抽取地下水进行灌溉导致地下水严重超采,引发了一系列环境问题,利用水价机制压采地下水。**【目的】**研究冬小麦适宜灌水量的水价方案。**【方法】**依据2007—2016年中国科学院栾城农业生态实验站冬小麦不同灌水次数和灌水量的长期灌溉试验资料,建立了作物产量对耗水和灌水的响应关系,研究了不同降水年型下最优灌水量和灌溉效益随水价的变化,确定了不同灌溉策略下的水价优化方案。**【结果】**与目前灌溉制度相比,当冬小麦生育期不灌溉时,平均减产达27%,枯水年产量降低近50%,水价的临界值是2.79元/m³,高于这个水价灌水收益为负,低于这个水价,灌水收益为正。为保证农民净收入不变,应平均每季补贴3678元/hm²。当小麦季地下水消耗不超过100mm时,平均水价应定为1.37元/m³,平均产量损失8.2%,应给予农民的补贴为2556元/hm²。当地下水消耗不超过200mm时,平均水价应定为0.38元/m³,产量平均损失1.3%,应给予农民的补贴为942元/hm²。**【结论】**宜采用水价加补贴回补方式鼓励农民采取节水灌溉。

关键词:限水灌溉;水价;产量;经济收益;补贴

中图分类号: S274.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180043

闫宗正,房琴,路杨,等. 河北省地下水压采政策下水价机制调控冬小麦灌水量研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(8):91-97,128.

0 引言

河北平原是中国重要的粮食产区,其中冬小麦在保证国家粮食安全中占有重要地位。河北平原地处暖温带半湿润半干旱大陆季风气候,降水多集中在6、7、8月,占全年降水量的70%以上,冬小麦季降水远低于需水量^[1-2]。因此补充灌溉是保证小麦高产的重要措施。河北平原灌溉水70%来源于地下水,每年灌溉用水量远大于地下水补给量,导致地下水位持续下降^[3],1984—2015年地下水位下降了20~40m,年均下降速率为0.43~0.72m/a,造成了大面积区域地下水漏斗和严重的地面沉降等生态环境问题,并威胁区域灌溉农业的可持续发展^[4]。为保护地下水资源,2014年国家开始实施联合治理河北省地下水超采,提出以节水为核心的多领域“压采”举措。

在实施地下水压采地区,在限量灌溉下制定合理灌溉制度对减少产量损失和提高灌溉水分利用效率(Irrigation water use efficiency, IWUE)有积极意义^[5-7]。在利用有限水灌溉技术和制度方面,我国学者提出了不同作物的非充分灌溉模式,并已在农业生产中发挥了重要作用,例如干旱地区广泛应用的覆膜侧渗沟灌技术、垄膜沟种集雨保墒技术^[8]、膜下滴灌技术^[9]、调亏灌溉制度^[10]、分根交替灌溉制度^[11]等已得到大面积推广应用,对我国节水农业发展产生了明显的推动作用。长期以来,人们对河北平原灌区的冬小麦,实施无偿取水、低价供水的政策,客观上助长了水资源的浪费。在节水农业发展中,农业节水技术的应用主体是农民,目前由于河北平原灌溉只收取电费,没有收取水资源费,农民节水意愿和动力明显不足。适当提高水价,能够促进灌区农业灌溉节约用水,有利于灌区水资源的持续利用^[12]。当农业灌溉水价提高10%,农业用水量将下降5.71%~7.41%^[13]。可持续发展条件下制定的农业水价应能应用经济规律对用水户对水资源的需求进行调节,最终促进农业用水资源的开发、利用和保护^[14]。我国灌区不收取水资源费用,低廉的水资源利用成本

收稿日期:2018-01-14

项目资助:国家重点研发计划课题(2016YFC0401403);河北省科技支撑计划课题(14227007D)

作者简介:闫宗正(1992-),男,硕士研究生,主要从事农田节水机理与技术研究。E-mail: yanzongzheng15@mailsucas.ac.cn

通信作者:张喜英(1965-),女,研究员,主要从事农田节水机理与技术研究。E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn

造成水资源大量浪费,水利工程依赖国家财政不能得到及时维修,水资源不能得到有效保护。所以在未来应该对灌溉水收取水资源费用,使水价和水资源开发成本相结合,考虑农民承受能力,逐步将农业水价提高,并通过补贴方式减少农民经济损失。水资源价格的制定涉及社会政策、经济环境、粮食生产等诸多方面,具体定价应该考虑自然资源特征和经济条件^[15]。研究认为实行可持续发展的水价,应以水资源、水环境和供水工程的承载能力为定价核心内容,以用水户承载能力为边界条件。王剑永^[16]研究了超用加价,节水奖励、损失补贴的可行性。朱黎黎^[17]研究表明水价是影响水分利用效率不可忽略的重要因素。徐明^[18]研究表明农业节水补偿中缺乏合理的农业水价制度且水权制度有待完善。影响农户采取节水措施与否即节水意愿的关键因素取决于与农户自身利益最大化相关的因素。只要与农户的切身利益相关,政策惠农,执行利农,为了效益的最大化原则,在农业生产过程中农户会自觉地采取节水措施从事农业生产^[19]。因此,如何制定科学的水价政策,实现多节水多补偿,提升农民节水自觉性和主动性对节水农业持续发展有重要作用。国内外的实践表明,水价在节水中具有重要的作用,对提高水的利用效率,促进水资源优化配置发挥着重要作用^[20]。目前节水灌溉技术发展迅速,科研机构和政府部门积极推广节水技术但是效率低下,农户运用节水技术动力不足,这些与水价政策均有一定的关系^[21]。为了水资源可持续利用,需充分认识和估量水价与水资源需求的关系,通过经济手段激发人们的节水意识。

科学合理的水价制定,依赖于作物产量对不同灌水量的响应。以灌溉水获取最大产量或最大经济效益的灌溉定额随年型变化而变化,建立产量和效益对耗水和灌溉水响应关系,有助于制定科学合理的水价,推动节水压采策略的实施。为此,基于2007—2016年在中国科学院栾城农业生态实验站进行的冬小麦不同灌溉次数和灌水量下的长期灌溉试验,建立不同降水年型下作物产量与耗水和灌水响应关系,研究不同水价条件下最优灌水量和灌溉效益随水价的变化,确定不同用水量下的水价优化方案,为通过水价改革推进地下水压采提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2007—2016年在栾城农田生态系统实验站进行。该站地处海拔50 m,北纬37°50',东经114°40',属于为暖温带半湿润半干旱大陆季风气候。该地区的种植制度为冬小麦—夏玉米1年2熟。年平均降水量为480 mm,70%降水集中在7—9月(夏玉米生长季)。年平均温度为12.7℃。试验地土壤为潮褐壤土,0~2 m田间体积持水率为36%,凋萎系数为13%(体积)。耕层(0~20 cm)的有机质质量分数为1.8%,全氮量1.2 g/kg,速效磷量21 mg/kg,速效钾量80 mg/kg,速效氮量92 mg/kg。

1.2 试验设计

试验品种为科农199,设置过量灌溉和亏缺灌溉共6个处理,当地农户灌溉量为200~300 mm,设计从全生育期不灌溉到灌溉5次,分别用I0、I1、I2、I3、I4、I5表示。每次灌水70 mm,小区面积40 m²,每个处理4次重复。处理之间有2 m的保护行隔开。每年10月10—15日播种,翌年6月10—15日收获。小麦播种前,施基肥二铵375 kg/hm²(含P₂O₅量46%和含N量16%)、尿素150 kg/hm²(含N量46%)、氯化钾150 kg/hm²(含K₂O量60%),拔节期施300 kg/hm²尿素(含N量46%)作为追肥,随拔节期的灌水施入,没有灌水的处理冬小麦拔节期的追肥选择降水天气,随雨施入。不同灌溉处理灌水时间和生育期总灌溉量见表1。除了灌水量不同,冬小麦生长期其他各项管理措施与当地大田管理水平保持一致。

表1 冬小麦不同灌溉处理灌水时间和灌水量

处理	灌水时间	总灌水量/mm
不灌水(I0)	-	0
灌水1次(I1)	拔节期	70
灌水2次(I2)	拔节期、扬花期	140
灌水3次(I3)	拔节期、抽穗期、灌浆期	210
灌水4次(I4)	越冬期、拔节期、抽穗期、灌浆期	280
灌水5次(I5)	越冬期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期	350

1.3 测定项目与方法

土壤含水率利用中子仪进行测定,每个小区安装2 m深的中子管,作物生育期每7~10 d测定1次,每20 cm为1层。成熟期每个小区人工收割,利用脱粒机脱粒,晾干后测定籽粒产量。气象数据来自中国科学院栾城农业生态系统试验站建有的标准气象站,气象站距离试验地50 m。可测定逐日降水、温度、湿度、风速和辐射等气象因素。

作物生育期耗水(ET)根据水量平衡公式计算:

$$ET = SWD + P + I + W - D - R, \quad (1)$$

式中： ET 为作物生育期实际耗水量(mm)； SWD 为0~2 m土体的土壤水分消耗量(mm)，即从播种到收获0~2 m土体土壤储水量的变化，土壤储水量是指一定土层厚度的土壤水分，以水层深度(mm)表示，其计算公式为： $Q=w \times h$ ，其中 Q 为土壤储水量(mm)， w 为体积含水率(%)， h 为土层厚度(mm)； P 为降水量(mm)； I 为灌溉量(mm)； W 为土壤毛细管上升水量(mm)； D 为根层以下水分下渗量(mm)； R 为地表径流量(mm)。试验期间没有地表径流，一般认为地下水位埋深大于4 m时，农作物对于地下水的提取作用可以忽略不计，目前试验区周围的潜水位埋深约为40 m，因此， W 和 R 可以忽略^[7]，故式(1)可以简化为：

$$ET = SWD + I + P - D \quad (2)$$

利用下式计算 D ：

$$D = \sum D(t) = -K \frac{dh}{dz} \quad (3)$$

式中： $D(t)$ 为 t 时刻冬小麦2 m深土层底部的水流通量(mm/h)，在小麦生育期内对 $D(t)$ 求和可得到 D ； K 为非饱和导水率(mm/h)； h 为土壤水势(cm)； z 为垂直方向上的距离(利用200 cm和180 cm土层的土壤含水率计算， z 为20 cm。 h 包括重力势和基质势；基质势的计算根据土壤水分特征曲线基质势与体积含水率的关系求得；非饱和导水率根据饱和导水率与土壤体积含水率的关系计算^[22]。

在试验区农田灌溉量全部来自于地下水，所以可计算出作物生育期的地下水消耗量(CGW)，即：

$$CGW = I - D \quad (4)$$

式中： I 为灌溉量(mm)； D 为根层以下水分下渗量(mm)。

1.4 投入产出计算依据

冬小麦生产投入如表2所示。小麦生产构成中的主要消耗为化肥、种子、农药、灌溉耗电以及上茬玉米秸秆粉碎、耕作、播种和收获的农机费用等直接投入，其价格依据当地市场实际的价格进行计算；小麦季施用的磷酸二铵和氯化钾为玉米季和小麦季共用，玉米季不再施用磷酸二铵和氯化钾，本研究认为小麦季所使用化肥可被小麦季用完。由表2计算可得出，冬小麦生长季除去灌溉的直接投入费用为4 950元/hm²。冬小麦产出收益根据小麦市场价格2.4元/kg乘以产量计算。净收益为产出减去直接投入。

表2 冬小麦生长季的直接投入

项目	主要费用
化肥和种子	尿素:540元/hm ² ;磷酸二铵:510元/hm ² ;氯化钾:375元/hm ² ;种子:450元/hm ²
耕作	玉米收获后,秸秆粉碎2遍、旋耕2遍总费用1500元/hm ²
小麦播种和收获	小麦播种375元/hm ² ;小麦收获600元/hm ²
杀虫剂和除草剂	600元/hm ²
灌溉	灌溉起垄:100元/hm ² ;灌溉基础设施:400元/hm ² ;灌溉消耗劳动力:每次200元/hm ² ;抽水电费0.22元/m ³

1.5 作物产量对灌溉的响应模型

在一定灌水范围内作物产量与灌溉水量、耗水量之间的水分生产函数均为二次曲线^[23-24]，本研究中灌水量在该范围内，故产量与灌溉水量、耗水量关系的关系可用下式表示：

$$Y = a + b \cdot I + c \cdot I^2 \quad (5)$$

$$NI = a + b \cdot ET + c \cdot ET^2 \quad (6)$$

式中： Y 为作物产量(kg/hm²)； I 为灌水量(mm)； NI 为净收益(元/hm²)； ET 为蒸散量(mm)； a 、 b 、 c 为经验系数。

依据微观经济学中单要素投入的利润最大化原理^[25]：灌溉水的边际效应 $M_f = dY/dI = 0$ 时，灌溉水带来的产量最大。这样可求得最大产量时的灌溉量，即：

$$I = -b/2c \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 水文年型划分及试验期间的降水情况

利用Pearson-III分布划分降水年型，分别选定25%、50%、75%为界限指标，依次根据冬小麦季降水保证率划分降水年型，小于保证率为25%的年型定位丰水年，保证率介于25%~75%之间为平水年，大于75%保证率年型为枯水年。分析1987—2016年栾城试验站冬小麦季27 a降水量数据，不同降水量水平的降水频次与降水保证率如图1所示，由图1和表3可知，冬小麦全生育期降水量>129 mm属丰水年，94 mm左右为平水年；<77 mm为枯水年。在试验设置年份2007—2016年冬小麦季，降水量变化范围46.0~153.1 mm，平均值

80.9 mm。划分出丰水年1 a, 平水年1 a, 枯水年7 a。其中2007—2008降水量153.1 mm是典型的丰水年, 2012—2013降水量88.6 mm年是典型的平水年, 2010—2011年降水量最低, 仅为46.0 mm, 作为典型的枯水年。

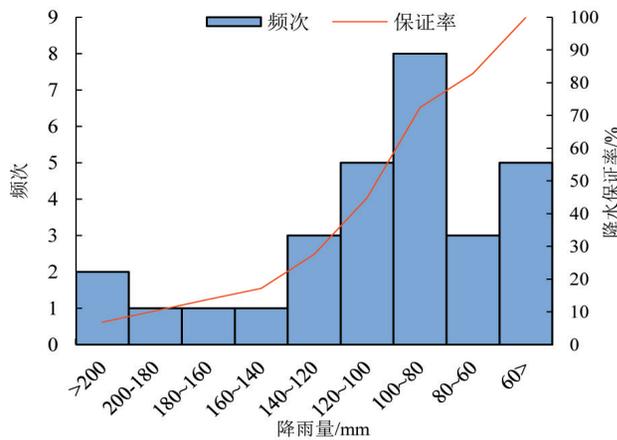


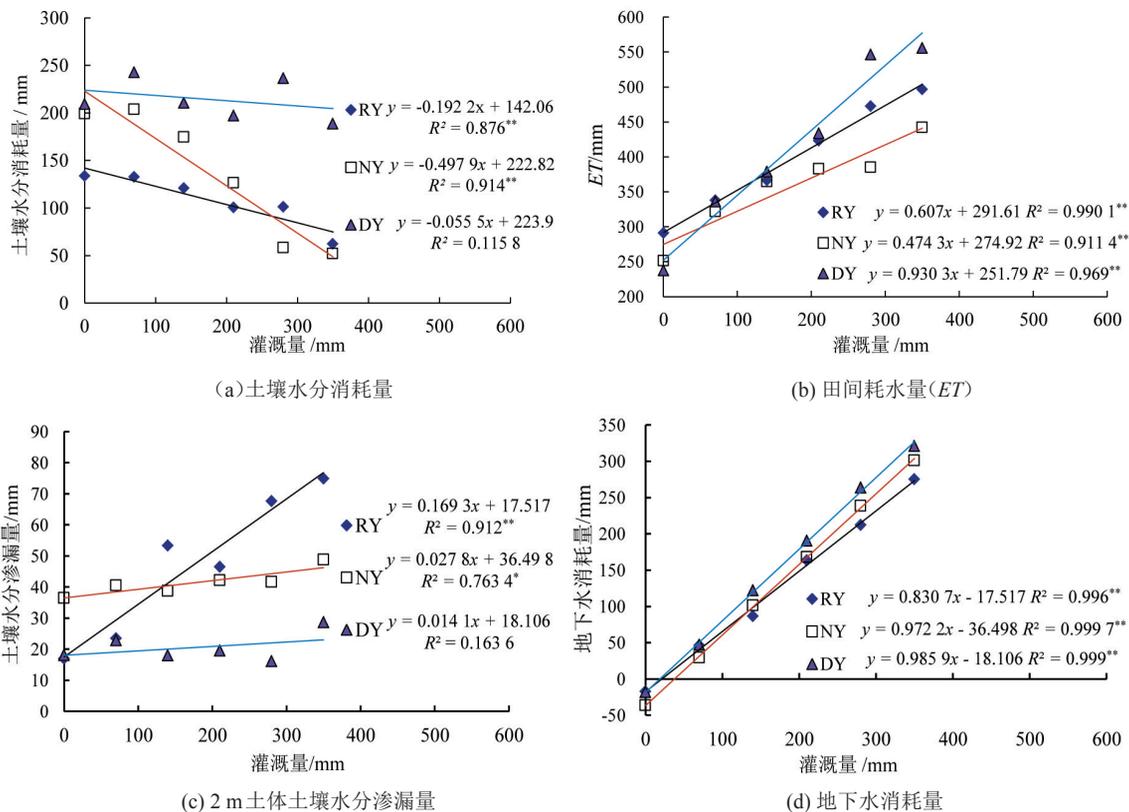
图1 1987—2016年试验地点冬小麦季降水分布直方图

表3 2007—2016试验期间冬小麦季降水年型

年份	降水量/mm	年型
2007—2008	153.3	丰水年
2008—2009	83.2	枯水年
2009—2010	77.4	枯水年
2010—2011	46.3	枯水年
2011—2012	81.7	枯水年
2012—2013	88.6	平水年
2013—2014	60.6	枯水年
2014—2015	76.4	枯水年
2015—2016	80.8	枯水年

2.2 不同水文年冬小麦耗水构成

图2(a)表明,随着灌水量增加,土壤水分消耗显著下降,不同年型下土壤水分消耗有较大差异。枯水年消耗土壤水最多,大约是平水年的1.6倍、丰水年的2倍。枯水年、丰水年、平水年的土壤水消耗占蒸散量的比例平均为60%、40%和30%。这表明冬小麦播种前的土壤储水对满足小麦生育期水分需求至关重要。图2(b)表明随着灌溉量的增加,作物生育期耗水显著增加。图2(c)表明根层水分下渗量总体随着灌溉量的增加而增加,在丰水年、平水年呈显著增加趋势。在不灌溉情况下也存在少量水分渗漏,平均渗漏量为24 mm。枯水年、平水年、丰水年的下渗量占灌溉量的13%、27%和28%,这表明在不同降水年型下均有土壤水下渗,而枯水年的下渗量大约是平水年、丰水年的50%。图2(d)表明随着灌溉量的增加,地下水净消耗量也在显著增加,因此,减少灌溉用水量是减少对地下水消耗的最重要手段。



注 RY为丰水年,NY为平水年,DY为枯水年;*表示 $p \leq 0.05$,**表示 $p \leq 0.01$;下同。

图2 冬小麦耗水量及其构成的变化

2.3 冬小麦水分生产函数

回归分析表明产量、经济效益与灌溉量、农田耗水量分别呈二次抛物线关系,其相关性呈极显著水平,图3(a)、图3(b)为农田耗水量与产量、净收益均呈极显著的抛物线关系,不同降水年型响应曲线不同。图3(c)所示产量随着灌溉量增加而增加,纯收益也随着灌溉量的增加而增加,但当生育期灌水量大于一定量时,灌水效益降低,不同年型下相关关系有一定差异。在I0处理下,产量由大到小依次为丰水年>平水年> 枯水年,表明降水量是影响旱作条件下冬小麦产量主要因素之一,降水较多的年份可以增加旱作条件冬小麦产量。在灌溉条件下平水年和丰水年产量最大值并没有出现在灌溉量最大的I5处理,表明冬小麦灌水量并不是越多越好,适度灌溉对冬小麦产量形成更为有利。

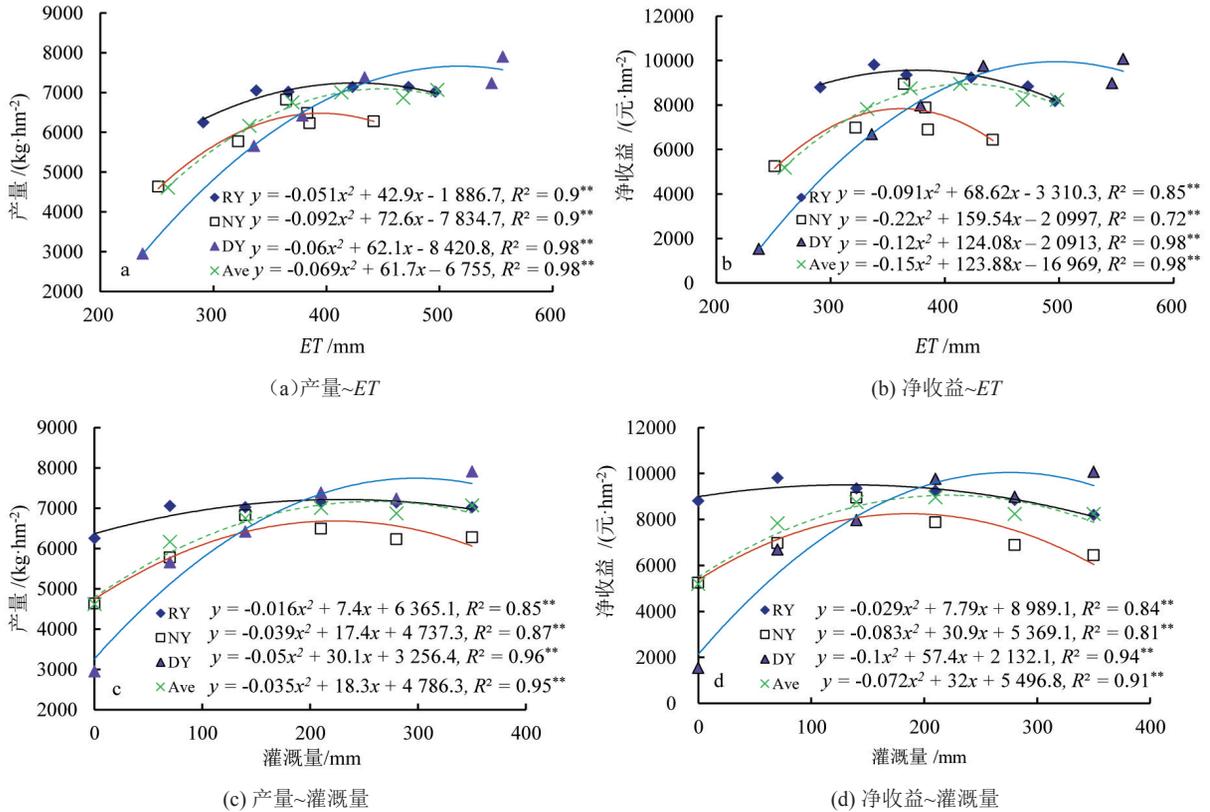


图3 冬小麦产量、净收益与灌溉量、生育期耗水量(ET)之间的函数关系(Ave表示均值)

不同灌溉处理的收益如图3(d)所示,不同处理间净收益存在较大差异。I0处理下,丰水年、平水年、枯水年净收益分别为8798、5236、1534元/hm²,枯水年净收益最少,丰水年净收益最多是枯水年的5.7倍,表明在旱作条件下降水是影响净收益的重要因子。不同年份在灌溉处理下净收益均呈现先升后降的趋势,呈抛物线形状。原因是灌溉量较小时(比如I1处理),可以大幅降低水分胁迫造成的产量损失,然而随着灌溉量增加供水成本也增加,而产量增加幅度小或减产,造成净收益出现不增加或下降趋势。所以对于净收益而言,存在一个最优化的灌溉量。如图3(d)所示,丰水年、平水年、枯水年曲线的极值最高点即最优灌溉量分别为138.5、196.3、286.7 mm。枯水年的最优灌溉量数值最大,丰水年的最优灌溉量最小,表明在不同的降水年型下选择最适的灌水量可获得最大化收益。

2.4 实现最高收益的灌溉量对水价的响应

依据灌溉量与净收益之间的抛物线函数关系(图3(d)),可计算出实现最高净收益的灌溉量。当收取水费时,实现最高净收益的灌溉量即最优灌溉量将随之改变,最优灌溉量与水价的关系为负相关关系,并且不同水文年型下其关系不同(图4)。根据图4不同水文年型下最优灌溉量与水价的关系可计算出,在丰水年,当水价为0~0.67元/m³时,达到最大净

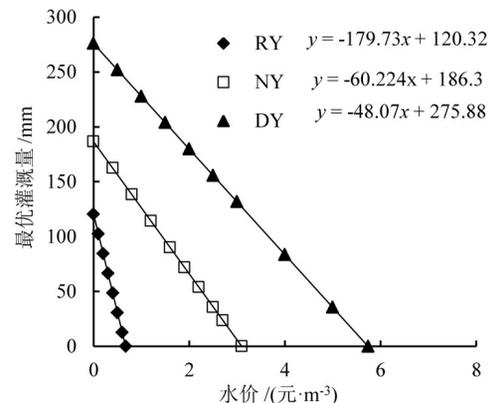


图4 不同降水年型下最优灌溉量与水价的关系

收益需要灌溉,水价高于0.67元/m³时则灌溉收益为负;在平水年,当水价为0~3.08元/m³时,达到最大收益需要进行灌溉,当水价高于3.08元/m³时,灌溉不会带来任何收益;而枯水年当水资源费收取0~5.74元/m³时,达到最大净收益需要灌溉,高于5.74元/m³时则灌溉收益为负。由此可以看出,不同水文年对灌溉实现效益增加的水价由强到弱依次为枯水年>平水年>丰水年。

2.5 不同压采目标下的临界水价与补贴

在不同地下水压采目标下,农田可利用灌水量不同,可利用不同的水价和补贴机制实现地下水限采。根据灌溉量和地下水消耗量的线性关系(图2(d))可计算控制灌溉用量,根据水价和灌溉量的线性关系(图4)可计算临界水价。根据产量和灌溉量的抛物线关系(图3(c))可通过微分求极值的方法计算获得产量和产量损失(产量损失=最优灌量下可获得的高产量-控制灌溉量可获得产量),根据产量和灌溉量的抛物线关系(图3(d))可通过微分求极值的方法计算最优收益以及对农民的补贴(补贴额度=在最优灌溉量下的最高收益-控制灌溉量下的可获取收益)。表4列出了冬小麦季地下水消耗0、100和200 mm时控制灌溉量、临界水价、产量、产量损失率、收益和灌水补贴。

表4 不同灌水可利用量下的临界水价与补贴

地下水消耗量/mm	年型	控制灌溉量/mm	临界水价/(元·m ³)	产量/(kg·hm ²)	产量损失率/%	净收益/(元·hm ²)	补贴/(元·hm ²)
0	丰水年	21	0.55	6 515	9.7	8 987	390
	平水年	38	2.47	5 336	20.2	5 485	2 764
	枯水年	18	5.36	3 791	51.0	2 167	7 881
	平均	26	2.79	5 214	27.0	5 546	3 678
100	丰水年	141	0	7 215	0	9 364	0
	平水年	140	0.76	6 413	4.0	7 004	1245
	枯水年	120	3.25	6 134	20.7	3 624	6 424
	平均	134	1.34	6 587	8.2	6 664	2 556
200	丰水年	262	0	7 215	0	8 820	0
	平水年	243	0	6 683	0	7 981	0
	枯水年	221	1.14	7 440	3.9	7 222	2 826
	平均	242	0.38	7 113	1.3	8 008	942

从表4可以看出,不消耗地下水时,平均产量损失达27%,而枯水年高达到51%,所以应给予农民补贴,以保证农民的净收入不受影响,经测算应平均每冬小麦季补贴3 678元/hm²,占补贴后总收益的40%;当允许小麦季消耗地下水为100 mm时,平均产量损失8.2%,应给予农民的补贴为2 556元/hm²;当允许消耗地下水为200 mm时,产量平均损失1.3%,应给予农民的补贴为942元/hm²。可见,地下水压采量越大产量损失越多,采取的水价越高,给予农民的补偿也越多。

3 讨论与结论

长期以来,我国很多区域实施无偿取水、低价供水的政策,客观上助长了水资源的浪费。国内外的实践表明,水价在节水中具有重要的作用,对提高水的利用效率、促进水资源优化配置发挥着重要作用。目前节水灌溉技术发展迅速,科研机构和政府部门积极推广节水技术但是效率低下,农户运用节水技术动力不足,这些与水价政策均有一定的关系。为了水资源可持续利用,需充分认识和估量水价与水资源需求的关系,通过经济手段激发人们的节水意识^[26]。

研究表明,适当提高水价,能够促进灌溉区农业灌溉节约用水,有利于灌溉区水资源的持续利用^[12]。当农业灌溉水价提高10%,农业用水量将下降5.71%~7.41%^[13]。然而水资源价格的制定涉及社会政策、经济环境、粮食生产等诸多方面。水价由很多部分组成,使得定价困难。具体定价应该考虑自然资源特征和经济条件^[14]。本研究通过长期定位试验建立试验区的冬小麦产量和净收益对灌溉量的响应函数,计算出了临界水价,表明当水价为0.38元/m³时可以控制小麦季地下水开采量为200 mm,当水价提高到1.34元/m³时,可控制小麦地下水开采量到100 mm。如果水价制定为2.79元/m³时,可实现地下水零开采。徐明^[18]研究表明农业节水补偿中缺乏合理的农业水价制度且水权制度有待完善。影响农户采取节水措施与否即节水意愿的关键因素取决于与农户自身利益最大化相关的因素。只要与农户的切身利益相关,政策惠农,执行利农,为

了效益的最大化原则,在农业生产过程中农户会自觉地采取节水措施从事农业生产^[19]。本研究通过计算农户净收损失给出了补贴额度,通过补贴降低农户对经济的损失。补贴额度根据地下水开采量给定,当开采量为200 mm时补贴额度为942元/hm²,当开采量为100 mm时补贴额度为2 556元/hm²;当开采量为0时,补贴额度最大为3 678元/hm²。目前实际灌溉成本为冬小麦生产总投入的22%,通过水价改革增加灌溉成本,再通过补贴方式返还给农民,这种方式既节约了水资源又保护了农民的经济利益是一种一被农户接受的可持续节水方案^[16]。综上所述本研究利用水价加补贴回补方式鼓励农民采取节水灌溉制度。研究结论明确给出了根据每年的地下水可开采量制定相应的水价的方案。并且,本研究明确了节约灌水补贴措施和具体补贴额度。在未来还可进一步发展到水权制度,例如在澳大利亚每个用水者必须获得水权才能进行灌溉,水权可以交易,每年单位面积上的水权可用水资源数量随可供水总量而变化,实现水资源科学有效管理^[27]。

参考文献:

- [1] FANG Q, ZHANG X, SHAO L, et al. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196(1): 33-43.
- [2] ZHANG X, WANG S, SUN H, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50(5): 2-9.
- [3] WANG Shiqin, SONG Xianfang, WANG Qinxue, et al. Shallow groundwater dynamics in North China Plain[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2):175-188.
- [4] SUN H, ZHANG X, WANG E, et al. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production:A case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70(1): 48-56.
- [5] ZHANG X, WANG Y, SUN H, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1 103-1 112.
- [6] CHEN Suying, SUN Hongyong, SHAO Liwei, et al. Performance of winter wheat under different irrigation regimes associated with weather conditions in the North China Plain [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2014, 8(4): 550-557.
- [7] LIU X, SHAO L, SUN H, et al. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat[J]. *Agricultural water Management*, 2013, 129(1): 73-80.
- [8] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 夏玉米沟垄覆盖集水效果及生态效应研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(3):28-30.
- [9] 谷岩, 孙扬, 郭占全, 等. 膜下滴灌不同玉米品种水分利用效率及产量研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016,35(3):51-55.
- [10] 张喜英, 裴冬, 胡春胜. 太行山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 36-41.
- [11] 李培岭, 李转玲, 燕辉. 不同灌溉方式下脐橙生育特性及品质的水肥一体调节效应[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(4):53-58.
- [12] 王文浩, 曹红霞, 蔡焕杰. 灌溉水价与灌区灌溉用水量关系研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1):82-85.
- [13] 毛春梅. 农业水价改革与节水效果的关系分析[J]. *中国农村水利水电*, 2005(4):2-4.
- [14] 喻玉清, 罗金耀. 可持续发展条件下的农业水价制定研究[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(2):77-80.
- [15] 韩青. 农业节水灌溉技术应用的经济分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [16] 王剑永. 河北省农业地下水灌区水价改革承受能力研究[J]. *海河水利*, 2017(6):59-61.
- [17] 朱黎黎. 阿克苏地区棉花生产用水效率及影响因素研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017.
- [18] 徐明. 农业节水综合补偿研究: 以山东省为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [19] 王宏焯. 农业水价综合改革对农户节水意愿的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [20] ZHANG X, CHEN S, SUN H, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1-10.
- [21] ZHANG X, PEI D, CHEN S, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6):1 620-1 626.
- [22] 张喜英, 张鲁, 刘昌明. 太行山前平原土壤水分特征曲线拟合参数的确定[J]. *华北农学报*, 2001, 16(2): 75-82.
- [23] CANNELL M G R. Mathematical models of crop growth and yield[J]. *Crop Science*, 2003, 43(3): 1 145-1 146.
- [24] 刘昌明, 周长青, 张士锋, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究[J]. *地理研究*, 2005, 24(1):1-10.
- [25] 赵文举, 马孝义, 张兴建, 等. 农业节水实现的经济学解析与激励机制[J]. *中国农村水利水电*, 2008(4):48-50.
- [26] JOHANSSON R C, TSUR Y, ROE T L, et al. Pricing irrigation water: a review of theory and practice [J]. *Water Policy*, 2015, 4(2): 173-199.
- [27] 池京云, 刘伟, 吴初国. 澳大利亚水资源和水权管理[J]. *国土资源情报*, 2016(5):11-17.

(下转第128页)

PET, indicated that the basin became increasingly drought, especially in the plain area from March to June and from September to October. Both *ET* and *PET* varied with land use from March to November, with *ET* decreasing in the order grassland<farmland <residence and *PET* changing in the opposite direction. *PET* peaked in May under in all land use, except forest where *PET* peaked in June. **【Conclusion】** Due to the influence of climate change and anthropogenic activities, *ET* has decreased steadily from 2000 to 2013 in the upper stream of the Huan River Basin, while *PET* has increased in the same period. Water shortage in the plain area is manifest.

Key words: Huan River Basin; MOD16; actual evapotranspiration; potential evapotranspiration; spatiotemporal distribution

责任编辑:陆红飞

(上接第97页)

Changing Water Price to Regulate Groundwater Extraction for Irrigating Winter Wheat in North China Plain

YAN Zongzheng^{1,2}, FANG Qin^{1,2}, LU Yang^{1,2}, LIANG Shuoshuo^{1,2}, ZHANG Xiyang^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Hebei Laboratory of Agricultural Water-saving, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Winter wheat-maize rotation consumed a large amount of groundwater and has resulted in groundwater table dropping steadily, threatening sustainable agricultural production in north China Plain. Mitigation strategy has been taken by Hebei Province in attempts to reduce groundwater exploitation by increasing the price of water pumped for irrigation. **【Method】** We first established the dependence of yield on water consumption and the amount of irrigation based on the long-term irrigation experiment at Luancheng Agro-Experimental Station located at a piedmont of Taihang in Hebei Province. We then developed the relationship between optimal irrigation amount and its economic return under different annual rainfalls, from which we analyzed the optimal water price for different irrigation schedules. **【Result】** Compared with conventional irrigation, prohibiting groundwater extraction could reduce the winter wheat yield by an average 27%, and 51% in dry years. The threshold water price should be 2.79 yuan/m³ at which irrigation will not bring any economic benefits to farmers; thus, on average, farmers should be subsidized 3 678 yuan/hm² to compensate their loss from yield reduction caused by such a prohibition. If the farmers were allowed to pump 100 mm equivalence of groundwater for irrigation annually, the average yield loss is 8.25% and the threshold water price should be 1.34 yuan/m³; on average, therefore, farmers should be subsidized 2 556 yuan/hm² for the lost yield. Similarly, if the groundwater allowance was increased to 200 mm, there would be no significant loss in yield and the threshold water price should be 0.38 yuan/m³; on average, farmers should be subsidized 942 yuan/hm². **【Conclusion】** We should encourage farmers to apply saving-water irrigation using water price added subsidies.

Key words: limited irrigation; water price; grain yield; economic profit; subsidies

责任编辑:白芳芳