

# 基于外部效应分析机井密度对地下水水位的影响

龚亚珍<sup>1</sup>, 关宝珠<sup>2,3</sup>, 代喆<sup>1</sup>, 张惠<sup>1</sup>

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 北京大学现代农学院, 北京 100871;  
3. 北京大学国家发展研究院, 北京 100871)

**摘要:** 农用机井的迅猛发展使地下水灌溉在我国的粮食生产中发挥了重要作用,但同时也使地下水面临超采严重和水位下降的严峻形势。为了可持续地利用地下水资源,政府需采取必要措施。鉴于地下水使用中存在的外部效应,合理控制机井密度可能是值得政府考虑的重要举措之一。然而,现有文献对机井密度与地下水水位之间的关系仍缺乏实证分析。本研究以兰考县为案例研究区,结合有关部门的机井普查数据和研究小组搜集的农户调研数据,利用空间分析和计量模型分析,发现机井密度与地下水水位之间具有显著的关系。具体而言,当某一机井100 m半径范围内的机井数目每增加一眼,该机井的水位显著下降约15 cm;机井密度对水位的边际影响随半径范围的扩大而下降。研究建议:政府在今后应采取有关措施控制机井密度,加强地下水取水许可证制度建设等配套措施。

**关键词:** 人口、资源与环境经济学;外部效应;计量模型;机井密度;地下水水位

过去几十年来,随着我国农用机井的迅猛发展,地下水灌溉在我国粮食生产中发挥了重要作用。仅以1992-2003年为例,我国机井数由335.38万眼增加到470.93万眼(增加了40%),井灌面积从12252.58 km<sup>2</sup>增加到16512.60 km<sup>2</sup>(增加了35%)<sup>[1]</sup>。目前,我国13个粮食主产区中,有一半以上依赖地下水灌溉<sup>[2]</sup>。然而,机井的迅猛发展也使我国地下水面临超采严重和水位下降的严峻形势。2012年,我国地下水超采面积高达19万km<sup>2</sup>,超采区域个数超过160个,年均不合理超采量达215亿m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。在我国地下水开发最早和利用程度最高的华北平原,地下水水位下降的形势尤其严峻<sup>[4-5]</sup>。该地区地下水水位以年均约1 m的速度下降<sup>[6]</sup>。由于我国的地表径流在过去几十年间的不断减少<sup>[7]</sup>,我国粮食生产对地下水灌溉的依赖程度还会继续增加。因此,地下水位的持续下降对我国未来的粮食安全提出了严峻挑战。

为应对地下水超采及地下水水位下降的问题,我国政府和有关部门已采取积极措施。2014年,经国务院批准,河北省率先开展地下水超采综合治理试点;2017年,山东省被列入第二批地下水超采区综合治理试点。在其他大部分地下水超采严重的地区,仅划分了超采区域,但尚未实施有效措施。据国务院新闻办公室2017年9月发布的新闻,在河北省等地下水超采严重的地区,政府将控制机井数量作为综合治理措施中的重要举措之一。2014-2017年间,河北省采取了改革水权制度和水权交易制度、强力关停农用灌溉机

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-12-28

基金项目: 中国人民大学科学研究基金项目(17XN1008)

作者简介: 龚亚珍(1972-),女,浙江余姚人,博士,副教授,研究方向为环境和资源经济学。

E-mail: ygong.2010@ruc.edu.cn

井等综合措施,累计关停了7063眼机井,完成了1033万户农民的水权分配<sup>[8]</sup>。那么,到底通过关停机井等措施控制机井数量是否会有效地遏制地下水位下降的趋势呢?

要回答清楚这个问题,首先有必要厘清地下水使用中存在的外部效应。由于同一含水层地下水相互连通,产权上很难分割,同一含水层中的地下水属于典型的公共池塘资源,用水户之间在用水行为上存在相关性。关于用水户之间的相关性,现有理论文献从“外部效应”角度展开讨论。具体而言,外部效应体现在三个方面:一是存量外部效应:某一农户对地下水的使用会影响其他农户可使用的总资源量;二是取水外部效应:某一农户的取水行为会改变其他农户的取水成本;三是策略外部效应:某一农户的取水行为会受到其他农户取水行为的影响<sup>[9-11]</sup>。由于存在上述外部效应,用水户之间会加大地下水资源的开采强度,加剧他们之间的用水竞争<sup>[12]</sup>。因此,从理论上而言,当某一特定区域内的机井密度越高时,农户在使用地下水灌溉时对彼此造成的外部效应可能越明显、彼此间的竞争用水动机也越强,对地下水资源的开发和利用速度可能就越快、地下水位下降速度也可能就越快。因此,合理控制机井密度可能是遏制地下水位下降趋势的重要措施之一。

纵观国外关于地下水使用中的外部效应研究,大部分以理论研究为主<sup>[9,12-16]</sup>。其中,有一些研究通过理论分析得出:当用水总量不受控制时,受外部效应的影响,用水者的用水量高于理论上的最优用水量<sup>[17-19]</sup>;还有一小部分研究从实证分析的角度得出:当用水总量不受控制时,地下水使用者有过度开采地下水的动机<sup>[20-22]</sup>。在我国,尽管有关学者发现在华北或西北地区,机井密度的不断增加使地下水位持续下降<sup>[23-26]</sup>,但已有研究主要基于案例分析,对两者之间的关系仍缺乏深入的定量分析和研究。

为部分弥补我国在相关实证研究中尚存的空白,本研究基于地下水使用的外部效应理论,通过空间分析和计量模型分析来探索和研究机井密度和地下水位之间的关系。研究也旨在为今后我国地下水资源的综合管理提供一些微观层面的实证分析依据。

本研究以位于华北平原南部的兰考县为研究区域。尽管该地区并非是我国地下水超采最严重的区域,但该地区面临的如下困境也出现在其他类似地区:地表水是重要的灌溉水源,并为地下水提供补给,然而,由于机井发展迅速,地下水的超采面积正不断扩大。如果在这样一些区域也能观察到机井密度对地下水位的显著影响,就不难推断:在那些原本已严重超采且缺乏地表水补给地区(如河北的纯井灌区),形势可能会更严峻。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

兰考县位于黄河冲积扇平原南侧、华北拗陷区内<sup>[27]</sup>,耕地面积105万亩<sup>[28]</sup>,是全国重要的商品粮生产基地。该县以种植业为主,夏熟作物主要为小麦,秋熟作物主要为玉米和大豆。2014年末67%的人口为农业人口<sup>[29]</sup>。农业是最主要的用水部门,农业灌溉以地表水为主。2013年,农业灌溉的用水量为1.25亿 $\text{m}^3$ (占总用水量的72%),其中78%左右为地表水灌溉<sup>[30]</sup>。

该县的地表水、地下水资源较丰富,2013年,该县的水资源总量为2.30亿 $\text{m}^3$ ,其中,地下水资源量为1.77亿 $\text{m}^3$ (占水资源总量的77%)<sup>[30]</sup>。该县的地表水灌溉主要依赖三义寨引黄灌区。该灌区始建于1958年,兰考县境内现有总干渠1条,长750 m,干渠

12条, 现有长度263.25 km, 完好长度240.2 km; 支渠48条, 现有长度264.14 km, 完好长度235.59 km; 斗农渠233条, 现有长度364.2 km, 完好长度364.2 km, 干支渠建筑物现有774座, 完好506座; 斗农渠建筑物现有1036座, 完好761座<sup>[31]</sup>。

浅层地下水是兰考县主要的地下水水源, 全县多年平均浅层地下水可开采量为1.5021亿m<sup>3</sup>, 可保灌65万亩耕地<sup>[32]</sup>。根据机井普查数据, 兰考县机井深度主要集中在30~50 m, 占比接近94%, 平均深度不到41 m, 深度低于60 m的机井占比超过98%, 12000多眼机井中仅有4眼机井深度超过90 m。若将0~60 m埋深界定为浅层地下水<sup>[33-34]</sup>, 由此可大致推测: 该县主要利用的地下水水源为浅层水, 很有可能全县大部分地区都在一个含水层抽水。

该县的浅层地下水含水层的厚度、埋藏及其展布主要由黄河古河道带、间带及其泛流带控制。古河道带及其间带广泛分布于中北部地区, 泛流带分布于西南部、南部及东部地区。自古河道带至间带、自泛流带的中心至两侧, 含水层地板埋深由深变浅, 砂层由厚变薄。浅层地下水垂直运动剧烈, 水平径流运动微弱<sup>[35]</sup>。浅层地下水的补给主要有降水、灌溉回归、引黄渠系入渗和黄河侧渗四个来源<sup>[34]</sup>。

近年来, 兰考县大力发展机井, 地下水开采力度加大, 使该县大部分地区已成为地下水超采区<sup>[36]</sup>。根据《河南省水利厅关于公布河南省地下水超采区范围的通知》, 兰考县中南部的城关镇、红庙镇等9个乡镇、多达421 km<sup>2</sup>的面积被划定为浅层地下水超采区, 面积约占全县面积的38%; 该县黄河大堤以南全部乡镇多达968 km<sup>2</sup>的面积被划定为深层承压水超采区, 深层地下水超采区面积约占全县面积的87%。

## 1.2 数据来源

研究综合使用了机井普查数据和研究小组搜集的调研数据。机井普查于2010-2012年间开展, 由当地有关部门提供。普查数据中详细记录了每眼机井的地理位置(经纬度和所属的村委会)、非灌溉季节地下水埋深(即: 机井水面到地面的距离)、机井深度和打井时间等信息。

调研数据由研究小组于2013年在兰考县30个村通过问卷调研获得。调研的农户总数是300户。在抽取调研农户时, 研究小组采用了两阶段抽样法: 首先, 用简单随机抽样的方法在兰考县的450个行政村中抽取30个村; 其次, 在村内部利用村花名册, 随机抽取10户农户。问卷调研的对象是被抽中农户的户主。调研的内容主要包括: (1) 农户灌溉情况: 农户种植的地块数及灌溉方式; (2) 农户使用的机井情况: 当年所使用机井的属性等。

此外, 研究小组还用手持GPS测定了被调研农户家庭的经纬度坐标及该家庭当年投入使用的机井的经纬度坐标。图1是根据GPS信息描绘的被调研农户的房子及其所用的机井在兰考县内的分布。由图可知: 经过两阶段抽样得到的样本村和样本户比较均匀地分布在兰考县境内, 具有较好的代表性。

## 1.3 研究方法

研究采用ArcGIS渲染成图和距离分析的方法对数据作了空间分析, 描述和分析了兰考县内机井的空间分布特征; 用计量模型分析了机井密度与地下水水位之间的关系。

### 1.3.1 空间分析

为了描述机井及其水位在空间上的分布特征, 研究小组结合农户调查信息和机井普查数据, 运用ArcGIS中的近邻分析工具, 计算被访谈农户家庭当年投入使用的每一眼机

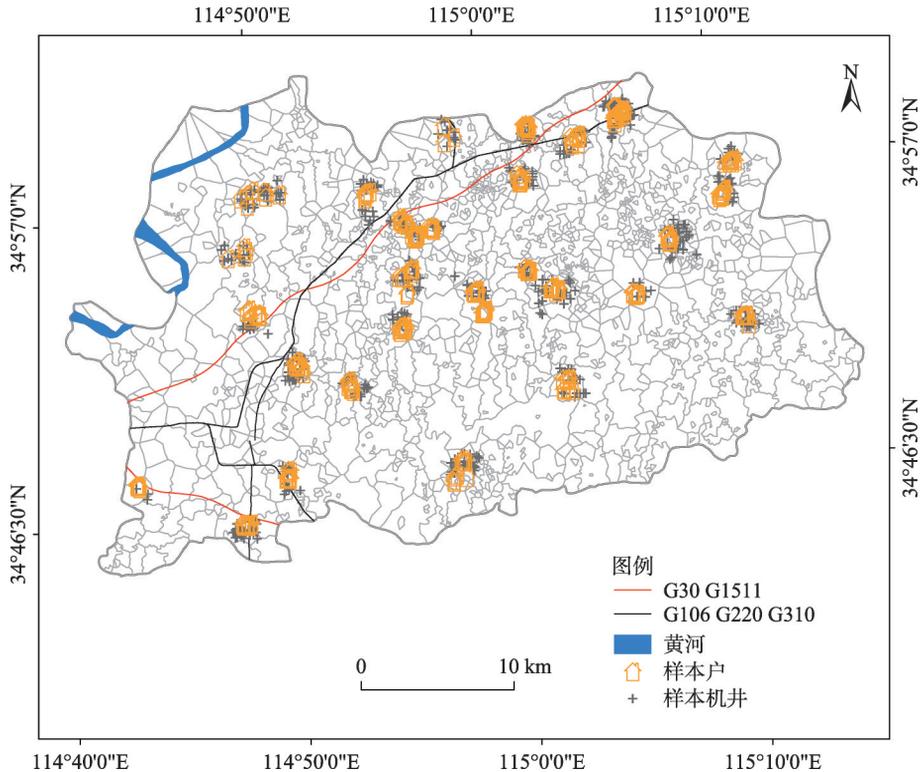


图1 被调研农户住房及其使用的机井的地理分布

Fig. 1 The location of surveyed households and wells

井到黄河、到国家级高速公路G30和G1511的距离。图2是兰考县境内机井在非灌溉季节的埋深情况。点的颜色越红,表明该机井水面到地面的距离越大。

图2中两条横跨兰考的红线分别代表国道G1511和G30,其中北部从西南至东北向的为G1511,西南部在兰考境内跨度较小的为G30。由图2可知,靠近国道的机井埋深大,这可能是由于越靠近国道交通运输越便利、市场化程度越高,农户可能越倾向于种植价值较高但用水量较大的经济作物,从而使靠近高速公路的机井中的地下水位越低。此外,高速公路的建设可能会影响地下水层的地质条件。在随后的计量模型中,通过控制机井到两条高速公路的距离来控制高速公路对地下水埋深可能带来的影响。

根据机井普查数据,兰考县2013年约有12246眼机井。兰考县总面积为1116 km<sup>2</sup>。由此估算出:2013年该县的机井密度约为0.11眼/hm<sup>2</sup>。有关资料显示:2010年我国灌溉机井的总数约为501万眼<sup>[37]</sup>,全国平均机井密度为0.005眼/hm<sup>2</sup>;2012年末华北五省的机井密度约为0.14~0.22眼/hm<sup>2</sup><sup>[38]</sup>。比较兰考县的机井密度和全国或华北平原五省的平均机井密度后不难得出:虽然兰考县的平均机井密度在华北平原五省中是相对较低的,但远高于全国的平均机井密度(约20倍)。因此,兰考的地下水开发强度较高。

为了刻画和衡量机井密度,研究小组结合农户调查信息和机井普查数据,运用ArcGIS中的空间连接工具计算出被访谈农户家庭当年投入使用的每一眼机井周围的机井数量。具体而言,以每一眼机井为中心,以一定的距离为半径画圆,然后计算所划定的圆内的机井总数。在某一特定的半径范围内,如果某眼机井周围的机井数量越大,说明它

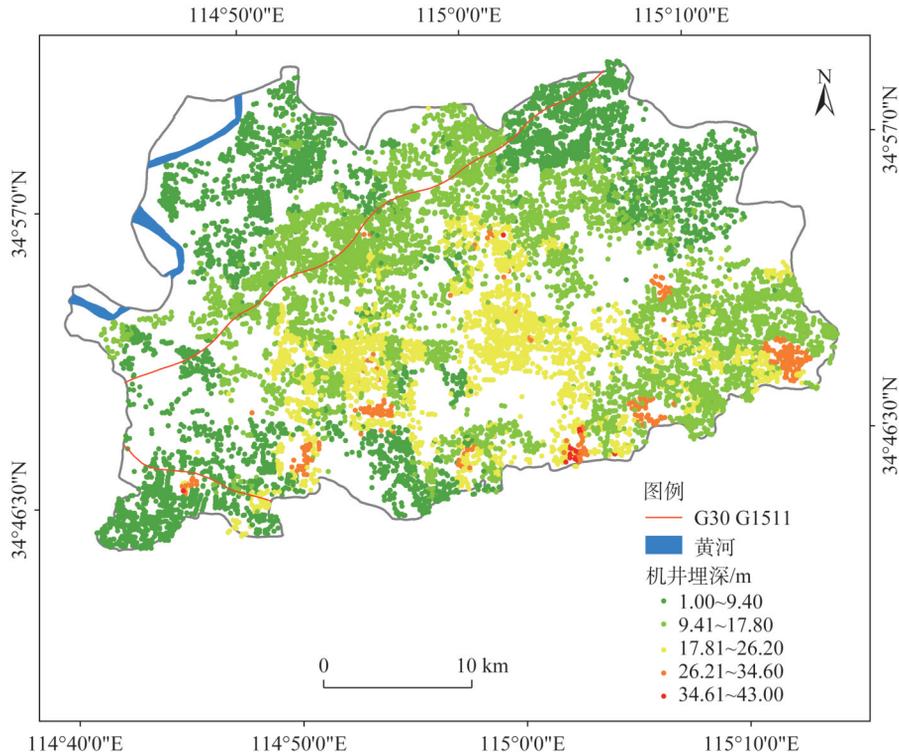


图2 兰考县境内机井的埋深情况

Fig. 2 Groundwater depth at the wells of Lankao county

周边的机井密度越高,也隐含着其他农户使用地下水时对其造成的外部性越大、该农户的竞争性用水动机可能也就越强烈,相互之间造成的外部性也就越大。

选择不同半径时主要考虑机井可能的影响半径。机井的影响半径是指抽水时形成的降落漏斗边缘到井中心的距离。影响半径的大小与当地渗透系数、含水层厚度、抽水井半径、抽水量、地下水位因素等有关。由于各地的水文条件、农业发展程度等因素之间差异较大,机井影响半径的差异也较大,有关经验数据表明,我国各地机井的影响半径从几十米到几百米不等<sup>[22,39]</sup>。根据影响半径的定义,农户在某眼机井中的取水行为,会对那些从该机井影响半径内其他机井取水的农户产生外部效应。研究小组在调研中也了解到,农户在机井中取水的难易程度除了受本村农户抽水行为的影响以外,还会受邻近村农户抽水行为的影响。

基于研究小组掌握的地理信息,兰考县各行政村的平均面积在1.19~4.93 km<sup>2</sup>之间,因此从农户抽水量之间的相互影响来看,相邻两个村之间可能存在的影响半径范围介于870~1770 m之间。由于研究小组缺乏兰考县境内包括渗透系数、含水层厚度、抽水井半径等跟机井的影响半径相关的参数,因此基于调研中掌握的相关信息和现有文献中关于全国各地机井影响半径的相关发现,选择了100 m、300 m、800 m、1000 m、1500 m和2000 m作为机井的影响半径,分别计算所调研农户当年使用的每一眼机井在这些半径所在圆范围内的机井总数。表1展示的是不同半径范围内的机井数量。

从表1可知:调研农户当年所使用机井在100 m、300 m、800 m、1000 m、1500 m

和 2000 m 半径所在圆内的平均机井数分别为 1 眼、5 眼、29 眼、43 眼、93 眼和 160 眼。据此计算出的机井密度大致为 0.14~0.32 眼/hm<sup>2</sup>。

### 1.3.2 计量模型分析

为探索机井密度与地下水位之间的关系, 本文以被调查农户当年投入使用的样本机井为研究对象, 构建如下计量模型:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_i + \beta_2 Z_i + v_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:  $Y_i$  为机井埋深, 用机井水面到地面距离来测度, 本文用埋深指标表示地下水位高低,  $Y_i$  越大, 表明机井所在处的地下水位越低;  $X_i$  是模型重点关注的解释变量, 它表示样本机井所在处的机井密度, 用样本机井  $i$  一定半径 (100 m、300 m、800 m、1000 m、1500 m 或 2000 m) 范围内的机井数量表示;  $Z_i$  表示其他会影响机井埋深的变量, 包括每一眼机井到黄河的距离、每一眼机井到兰考县境内两条高速公路 (G30、G1511) 的距离以及这两个距离的交叉项, 考虑交叉项的原因是考虑到这两条高速公路对地下水位的交互影响; 模型中包含了村虚拟变量  $v_i$ , 主要是为了控制村与村之间可能存在的差异, 其中包括村社会经济情况、地理位置、地下水层的地质条件、地下水管理制度等<sup>[26]</sup>;  $\alpha$  为模型中的常数项;  $\varepsilon_i$  是扰动项;  $\alpha$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  均为待估计参数。

模型用最小二乘法来估计。估计时, 考虑到各机井之间存在的异方差, 用了异方差稳健的标准误。

## 2 结果分析

### 2.1 空间分析和描述性统计分析结果

2013 年被访谈的 300 户农户共经营 1008 块地, 漫灌是他们进行农业灌溉时采用的主要方式。这些农户总共经营 649 眼机井, 当年全部投入使用。表 2 是几个关键变量的描述统计分析结果。

由表 2 可知: 机井的埋深差别较大。样本机井的平均埋深为 10.82 m, 埋深最小的机井水面离地面的距离只有 2 m, 而埋深最大的机井水面到地面的距离高达 25 m。例如: 三义寨前宜王村的平均埋深最低, 机井水面离地面的平均距离为 2 m, 城关乡金营村平均埋深最大, 机井水面离地面的平均距离为 24.28 m。前宜王村的埋深最小, 可能因为该村距离黄河较近并位于三义寨灌区内, 一方面容易获得地表水进行农业灌溉, 降低了对地下水的开采需求, 另一方面, 地表水可以补给地下水<sup>[33-34,40]</sup>。城关乡的金营村平均埋深最大, 可能因为金营村所在的城关乡内与国道 G30、G1511 的距离较近, 公路基础设施建设对地下水资源有负外部性<sup>[41]</sup>。

在调查中, 针对被访谈农户所使用的每一眼机井, 调研人员逐一向他们进行询问: “近 5 年来该机井的水位是否下降?” 基于农户回答, 在农户所经营的 649 眼机井中, 约有 80% 的机井在过去 5 年中水位呈下降趋势。其中, 约 41% 的机井在近 5 年水位下降较多, 约 38% 的机井近 5 年水位下降幅度相对较少。上述信息表明: 近 5 年来大部分农户已普遍

表 1 不同半径范围内的机井数量  
Table 1 Number of wells within different radiuses

半径大小/m	均值	标准差	最小值	最大值
100	1	1	0	6
300	5	3	0	17
800	29	13	1	68
1000	43	18	4	100
1500	93	35	6	222
2000	160	56	13	359

表2 一般描述性统计分析结果

Table 2 Results of descriptive statistics

变量名	均值	方差	最小值	最大值
机井埋深/m	10.82	5.49	2.00	25.00
地下水水位是否下降 (1=是; 0=否)	0.79	0.41	0	1
机井深度/m	39.21	5.43	20	75
机井到黄河的距离/km	17.86	8.45	2.39	35.73
机井到G30的距离/km	21.26	10.29	0.08	38.44
机井到G1511的距离/km	5.79	4.33	0.03	17.84
样本量	649			

感受到机井的地下水水位在下降。

被调查机井的平均深度约为 39 m, 最深的机井为 75 m, 井深超过 60 m 的机井仅占 2% 左右。由此可见, 被调查机井所用的地下水基本上是浅层地下水。

在被访谈农户所经营的 649 眼机井中, 它们受黄河水补给的情况和高速公路的影响程度各异。它们到黄河的平均距离是 17.86 km, 其中最近的距黄河仅为 2.39 km, 最远的则远达 35.73 km。样本机井到国家高速公路 G30 和 G1511 的平均距离分别为 21.26 km 和 5.79 km, 但有些机井离高速公路的距离不到 10 m。

## 2.2 计量模型估计结果

表3是计量模型的估计结果。表3中(1)~(5)列的结果表明: 机井周围的机井密度对地下水水位具有显著的影响。以某一特定长度为半径画圆, 当所画圆内的机井数量越大(即机井密度越大)时, 机井的水位就显著地降低。以半径为 800 m 的圆(大致相当于兰考境内一个村的范围内)为例, 在控制其他条件都不变的情况下, 在该半径所在圆范围内, 每多出一眼机井, 机井水位就会相应地显著下降 2 cm。由此可见, 机井水位与周边其他机井之间存在空间上的高度相关性。这种空间上的高度相关性可通过前面所作的理论探讨来解释: 由于受外部性(如存量外部性)和同一含水层地下水所具有的共有产权资源属性(即: 非排他性和竞争性)等因素的影响, 地下水使用者(如农户)会竞争性地使用地下水资源、加快利用各自所经营和使用的机井中的水资源。经过长期的动态博弈后, 农户之间对彼此所经营和使用的机井中的水位带来相互影响。当某一特定区域内(如一个村或相邻两个村)的机井数量越多时, 农户竞争性使用地下水资源的动机也就越强烈。这种情况在缺乏有效的产权安排时可能显得更加明显。因此, 上述结果也隐含了建立相关的制度安排和管理政策对地下水资源的可持续管理和利用具有重要意义。

关于机井密度与水位之间的关系, 表3中第1~第6列中与“不同半径范围内的机井数”这个变量相对应的系数表明: 机井密度对地下水水位的边际影响随半径的扩大呈递减趋势。当半径扩大到 2000 m 时(12.56 km<sup>2</sup>, 约超过两个村的面积), 机井埋深与周边机井的数量之间虽然呈正相关但相关性已不再显著。上述结果说明, 农户的取水行为给别的农户带来的外部性随井距的扩大呈下降趋势, 当半径扩大到一定范围(如超过两个村的面积)时, 周边机井的密度对机井水位的影响变得不再显著。

表3的结果还显示: 机井到黄河的距离、机井到 G30 和 G1511 的距离对机井水位均有显著影响。在保持其他变量不变的情况下, 机井到黄河的距离对机井水位有显著影响。当机井到黄河的距离每增加 1 km 时, 机井埋深会增加 0.5~0.6 m。黄河对机井水位

表3 计量模型估计结果

Table 3 Results of the econometric model

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
不同半径范围/m	100	300	800	1000	1500	2000
不同半径范围内的机井数	0.153*	0.091**	0.027**	0.023**	0.012**	0.005
	(0.083)	(0.041)	(0.013)	(0.011)	(0.006)	(0.003)
机井到黄河的距离/km	0.573***	0.563***	0.546***	0.531***	0.524***	0.543***
	(0.146)	(0.140)	(0.137)	(0.133)	(0.130)	(0.137)
机井到G30的距离/km	-0.231***	-0.243***	-0.223**	-0.210**	-0.211**	-0.221**
	(0.088)	(0.086)	(0.092)	(0.096)	(0.096)	(0.093)
机井到G1511的距离/km	0.286	0.266	0.402*	0.504*	0.589*	0.472*
	(0.186)	(0.186)	(0.224)	(0.262)	(0.303)	(0.266)
G30和G1511交叉项	-0.017***	-0.016***	-0.0206***	-0.023***	-0.024***	-0.021***
	(0.006)	(0.006)	(0.007)	(0.008)	(0.008)	(0.007)
常数项	5.819	6.056	5.254	4.797	4.601	5.000
	(3.955)	(3.768)	(4.143)	(4.301)	(4.443)	(4.444)
是否控制村虚变量	是	是	是	是	是	是
样本量	649	649	649	649	649	649
拟合优度	0.951	0.952	0.951	0.951	0.951	0.950

注：括号内为稳健标准误，\*\*\*、\*\*、\*分别表示在0.01、0.05、0.1水平上显著。

的影响可能通过两个途径：一方面，兰考县属于三义寨引黄灌区，农户可以利用渠道中的黄河水进行灌溉，将地下水作为一种补充水源，距离黄河越近，地表水源越充沛和稳定，农户对地下水的依赖程度低，因此，距离黄河越近，农户对地下水的开采量越少，地下水位越高<sup>[31]</sup>。另一方面，根据兰考县的水文地质图和相关文献资料，黄河对兰考县的地下水有补给作用，离黄河的距离越近，黄河对地下水的补给作用越明显，地下水位越高<sup>[33,35]</sup>。高速公路对机井水位的影响，可能通过如下渠道影响：高速公路的建设使当地与外界的联系变得紧密，促进了市场化程度，使农产品的运输成本降低。因此，离公路越近的农地上就可能种上市场价值较高但耗水量也较大的经济作物。由此，就会增加农作物对地下水资源的消耗，使那些离公路较近的机井水位也可能就越低<sup>[41]</sup>。

根据表3估计出来的系数，进一步做出半径长度内机井数量对机井水位的边际影响之间的关系图（图3）。如图3所示，随着半径长度的增加，样本机井周围机井数量的增加对机井水位的边际影响逐渐降低。也就是说，如果在不同半径范围内增加相同数量的机井，半径越大时地下水位下降的幅度越低。由此可以推测：新挖机井对现有机井水位的影响会随着距离的增大而降低。因此，在机井建设时，保持必要的井距有助于降低新挖机井对已有机井水位的影响。

### 3 结论与讨论

地下水资源在我国粮食生产中发挥日益重要的作用。然而，由于灌溉方式的粗放加上近年来机井数量的迅速增加，我国不少地区的地下水位持续下降，对我国粮食安全带来了严峻挑战<sup>[42-43]</sup>。今后，我国将面临粮食需求的不断增长和地下水资源可持续性利用的

双重约束。为此, 政府和其他有关部门有必要采取积极措施来遏制地下水持续下降的趋势。

本研究基于兰考县的农户调研数据, 采用空间分析和计量分析相结合的方法来探究农用机井密度对地下水埋深的影响。研究发现: 周围的机井数目每增加一眼, 机井水位在5%的显著性水平下最高下降约15 cm, 且周围机井的数量对地下水位的边际效应随着距离的增加减速下降。由此可见, 合理控制机井密度是我国政府对地下水资源加强管理时可以考虑的重要手段之一。

事实上, 早在20世纪80年代, 《关于北方地区抗旱打井情况和今后意见的报告的通知》<sup>[44]</sup>就提出: 在机井密度较大的北方平原地区, 今后主要以打更新井为主。然而, 从机井数目的增长情况来看, 这项动员性质的政策并未起到实质性的约束作用, 20世纪90年代以来, 北方17省(区、市)每年打井20万眼左右<sup>[1]</sup>。2014-2017年, 每年的中央一号文件都强调要对地下水超采区进行综合治理<sup>[45-48]</sup>。《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》<sup>[49]</sup>和《地下水管理条例(征求意见稿)》<sup>[50]</sup>则明确提出: 我国将通过实行用水总量控制、水位控制制度来确保地下水资源的可持续利用。其中, 规范取水许可制度和合理确定地下水取水井的布局 and 取水强度是控制地下水资源过度开采的重要手段, 这两项地下水管理政策尽管肯定了机井合理布局的重要性, 但仍然缺少对机井密度的明确约束。鉴于农业是最主要的用水部门以及机井密度的增加对地下水位的负面影响, 还需要一些更具体的政策来限制农用机井数目的增加, 降低对地下水的超采程度。

地下水资源作为典型的公共池塘资源, 在缺乏有效的产权安排情况下, 外部效应的存在会使地下水资源使用者具有竞争使用地下水的动机。因此, 机井密度的不断增加可能会加剧地下水位的下降。基于本文的研究结论, 提出如下政策建议:

第一, 在开发利用地下水时, 采用取水许可制度, 对村和农户的打井行为进行规范管理。具体而言, 水资源管理部门须对农户的新增机井要求进行评估, 依据评估结果决定取水许可证颁发与否, 要求农户在新增机井前必须取得取水许可证, 防止农户私下打井、任意取水。

第二, 在开发利用地下水时, 保持井距, 促进机井的合理布局。根据本文研究结论, 随着测量半径范围的扩大, 每增加一眼井对当前位置地下水埋深的边际效应递减, 且下降速度越来越慢, 当范围扩大到800 m以后, 每增加一眼井, 地下水埋深增加的幅度将为3 cm以下, 半径超过1500 m后, 再增加机井对当前位置地下水埋深没有影响。考虑到机井密度对地下水水位的影响和机井灌溉的需求, 本文的实证研究结果显示了严格控制机井之间的间距对地下水可持续利用的重要性。在实际操作中, 《机井技术规范》针对机井间距、机井数目给出了一个可供参考的计算公式<sup>[51]</sup>, 农用机井的间距还应当满足不低于公式计算出的距离, 以降低农户用水的竞争程度、促进地下水资源的可持续利用。

第三, 在机井密度较大、地下水开采程度高的地区, 如华北平原, 避免新增取水

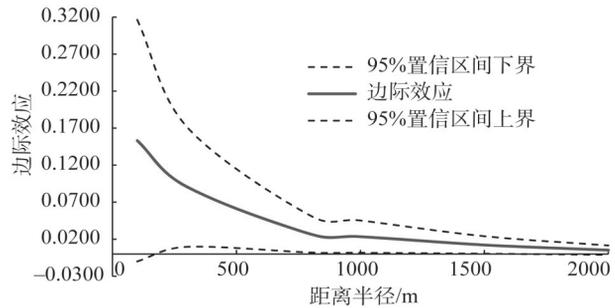


图3 半径与边际影响之间的关系

Fig. 3 The relationship between radius and marginal effect

井,以完善现有机井设施配套和打更新井为主。对还能使用的机井,应完善配套设施使其充分发挥作用,对因管理不到位不能充分发挥作用的机井,应当先进行修复和设施配套。当机井报废需要新打机井时,要求农户先填旧井,再打新井,以达到控制机井密度、避免农户之间过度用水竞争的目的。

### 参考文献(References):

- [1] 王晓玲,杜秀文,刘丽艳,等.我国井灌建设可持续发展研究.中国农村水利水电,2006,(8):6-11. [WANG X L, DU X W, LIU L Y, et al. Study on sustainable development of well irrigation in China. China Rural Water and Hydropower, 2006, (8): 6-11.]
- [2] 中国自然资源报.聚焦我国主要粮食基地地下水资源开发利用. [http://www.gtzyb.com/dizhikuangchan/20160322\\_94838.shtml](http://www.gtzyb.com/dizhikuangchan/20160322_94838.shtml), 2016. [China Natural Resources Daily. Focuses on the development and utilization of groundwater resources in China's major food bases. [http://www.gtzyb.com/dizhikuangchan/20160322\\_94838.shtml](http://www.gtzyb.com/dizhikuangchan/20160322_94838.shtml).]
- [3] 国家能源局.水利发展规划:2011-2015年. [www.nea.gov.cn/131677331\\_31n.pdf](http://www.nea.gov.cn/131677331_31n.pdf), 2012. [National Energy Administration. Water development planning: 2011-2015. [www.nea.gov.cn/131677331\\_31n.pdf](http://www.nea.gov.cn/131677331_31n.pdf).]
- [4] 魏忠义,任鸿遵.黄淮海平原地下水开采的水文效应.地理研究,1985,4(2):65-72. [WEI Z Y, REN H Z. Hydrological effects of groundwater abstraction in the Huang-Huai-Hai Plain. Geographical Research, 1985, 4(2): 65-72.]
- [5] 于静洁,任鸿遵.华北地区粮食生产与水供应情势分析.自然资源学报,2001,16(4):360-365. [YU J J, REN H Z. Crop yield and water supply in North China. Journal of Natural Resources, 2001, 16(4): 360-365.]
- [6] 王金霞,李玉敏.地下水埋深变动对农业生产影响的实证研究.人民黄河,2014,36(2):71-74. [WANG J X, LI Y M. Empirical study on the impact of groundwater depth change on agricultural production. Yellow River, 2014, 36(2): 71-74.]
- [7] 李玉敏,王金霞.农村水资源短缺:现状、趋势及其对作物种植结构的影响:基于全国10个省调查数据的实证分析.自然资源学报,2009,24(2):200-208. [LI Y M, WANG J X. Situation, trend and its impacts on cropping pattern of water shortage in the rural areas: Empirical analysis based on ten provinces' field survey in China. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 200-208.]
- [8] 国务院新闻办公室.河北举行地下水超采综合治理试点工作新闻发布会. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gssxwfbh/xwfbh/hebei/Document/1563445/1563445.htm>, 2017. [The Press Office of the State Council. Hebei held a press conference on the trial of comprehensive treatment of groundwater overextraction. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gssxwfbh/xwfbh/hebei/Document/1563445/1563445.htm>, 2017.]
- [9] GISSER M, SANCHEZ D A. Competition versus optimal control in groundwater pumping. Water Resources Research, 1980, 16(4): 638-642.
- [10] PROVENCHER B, BURT O. The externalities associated with the common property exploitation of groundwater. Journal of Environmental Economics and Management, 1993, 24(2): 139-158.
- [11] GONZALEZ A S. Ground water externalities. Developments in Water Science, 1989, 39: 361-371.
- [12] OSTROM E, GARDNER R, WALKER J. Rules, Games, and Common-Pool Resources. Michigan: University of Michigan Press, 1994.
- [13] GISSER M. Groundwater: Focusing on the real issue. The Journal of Political Economy, 1983, 91: 1001-1027.
- [14] ALLEN R C, GISSER M. Competition versus optimal control in groundwater pumping when demand is nonlinear. Water Resources Research, 1984, 20(7): 752-756.
- [15] RUBIO S J, CASINO B. Competitive versus efficient extraction of a common property resource: The groundwater case. Journal of Economic Dynamics and Control, 2001, 25(8): 1117-1137.
- [16] KATIC P G, GRAFTON R Q. Economic and spatial modelling of groundwater extraction. Hydrogeology Journal, 2012, 20(5): 831-834.
- [17] BRILL T C, BURNES H S. Planning versus competitive rates of groundwater pumping. Water Resources Research,

- 1994, 30(6): 1873-1880.
- [18] GARDNER R, MOORE M R, WALKER J M. Governing a groundwater commons: A strategic and laboratory analysis of western water law. *Economic Inquiry*, 1997, 35(2): 218-234.
- [19] SAAK A E, PETERSON J M. Groundwater use under incomplete information. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2007, 54(2): 214-228.
- [20] PFEIFFER L, LIN C Y C. Incentive-based groundwater conservation programs: Perverse consequences?. *Agricultural and Resource Economics Update*, 2009, 12(6): 1-4.
- [21] PFEIFFER L, LIN C Y C. Groundwater pumping and spatial externalities in agriculture. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2012, 64(1): 16-30.
- [22] HUANG Q, WANG J X, ROZELLE S, et al. The effects of well management and the nature of the aquifer on groundwater resources. *American Journal of Agricultural Economics*, 2013, 95(1): 94-116.
- [23] 王红雨, 全达人. 井灌区规划中最佳井距的确定方法. *宁夏农学院学报*, 1995, 16(3): 27-32. [WANG H Y, QUAN D R. A method to determine optimal well-spacing in well-irrigation area planning. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 1995, 16(3): 27-32.]
- [24] 南忠仁, 李易麟. 干旱区绿洲打井与地下水位变化研究: 以民勤县和张掖地区为例//2006中国科协年会, 2006. [NAN Z R, LI Y L. Study on the change of wells and groundwater table in the arid area: Taking Minqin county and Zhangye area as an example//2006 The Annual Meeting of the Chinese Association of Science and Technology, 2006.]
- [25] 陈玺, 陈德华, 王昭. 我国北方地区开采地下水发展农业的几点意见. *地球学报*, 2007, 28(3): 309-314. [CHEN X, CHEN D H, WANG Z. Some opinions on the groundwater exploitation for agricultural production in Northern China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 28(3): 309-314.]
- [26] 郭亮. 农村私人打井现象泛滥的原因, 危害及对策分析. *中国水利*, 2015, (12): 52-54. [GUO L. The causes, hazards and measures of private wells in rural areas. *China Water Resources*, 2015, (12): 52-54.]
- [27] 全长水, 靳孟贵, 王献坤, 等. 黄河故道兰考段地下水水化学特征. *工程勘察*, 2011, 39(12): 36-41. [TONG C S, JIN M G, WANG X K, et al. The groundwater hydrochemical characteristics in Lankao section of the Yellow River. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, 39(12): 36-41.]
- [28] 兰考县人民政府. <http://www.lankao.gov.cn/viewCmsCac.do?cacId=ff8080813a8c6683013a8c6c79e40017>. [The People's Government of Lankao County. <http://www.lankao.gov.cn/viewCmsCac.docacId=ff8080813a8c6683013a8c6c79e40017>.]
- [29] 兰考县统计局. 兰考县2014年国民经济和社会发展统计公报. <http://lktjxx.aikafeng.com/userlist/lktjxx/newshow-2307.html>. [The Statistical Bureau of Lankao County. National economic and social development statistical bulletin in 2014 of Lankao county. <http://lktjxx.aikafeng.com/userlist/lktjxx/newshow-2307.html>.]
- [30] 开封市2013年水资源公报. <http://www.kfsl.gov.cn/site/kfsl/488/info/2015/213.html>. [Water Resources Bulletin in 2013 of Kaifeng city. <http://www.kfsl.gov.cn/site/kfsl/488/info/2015/213.html>.]
- [31] 三义寨引黄灌区概况. <http://www.kfsl.gov.cn/site/kfsl/ncsl/info/2006/140.html>. [Introduction of Sanyizhai Yellow River Irrigation District. <http://www.kfsl.gov.cn/site/kfsl/ncsl/info/2006/140.html>.]
- [32] 兰考县环保局. <http://www.lkhbj.gov.cn/sitegroup/lkhbj/html/f47f7eee4a79c35e014a79e077760175/20170405083273883.html>. [Environmental Protection Bureau of Lankao County. <http://www.lkhbj.gov.cn/sitegroup/lkhbj/html/f47f7eee4a79c35e014a79e077760175/20170405083273883.html>.]
- [33] 王金山, 冯琳, 黄继超, 等. 河南省兰考县地下水水质分析及保护对策. *地下水*, 2008, 30(6): 105-107. [WANG J S, FENG L, HUANG J C, et al. Analysis of groundwater quality and protection countermeasures in Lankao county, Henan province. *Ground Water*, 2008, 30(6): 105-107.]
- [34] 兰考县中央财政小型农田水利重点县建设方案: 2009-2011. [Lankao county central government small county irrigation and water conservancy key county construction plan: 2009-2011.]
- [35] 李志国, 王道山, 郭山峰, 等. 河南省兰考县浅层地下水水质分析评价. *资源导刊: 地球科技版*, 2014, (5): 34-36. [LI Z G, WANG D S, GUO S F, et al. Analysis and evaluation of shallow groundwater quality in Lankao county, Henan

- province. Resource Guide: Earth Science Edition, 2014, (5): 34-36.]
- [36] 河南省水利厅. 河南省水利厅关于公布河南省地下水超采区范围的通知. <http://hnnsbd.gov.cn/sitegroup/hnsl/html/ff8080812ec35f60012ec6c110d70463/2ae4fb3a39a540aca17263d2cfd2a20b.html>. [Water Resources Department of Henan Province. Notice of Henan provincial department of water resources on the promulgation of the zone of groundwater overexploitation in Henan province. <http://hnnsbd.gov.cn/sitegroup/hnsl/html/ff8080812ec35f60012ec6c110d70463/2ae4fb3a39a540aca17263d2cfd2a20b.html>.]
- [37] 张嘉星, 齐学斌, 乔冬梅. 农业灌区机井规划布局研究进展. 农学学报, 2016, 6(2): 96-100. [ZHANG J X, QI X B, QIAO D M. Research process of motor-pumped well planning layout in agricultural irrigation district. Journal of Agriculture, 2016, 6(2): 96-100.]
- [38] 杨宇, 王金霞, 黄季焜. 农户灌溉适应行为及对单产的影响: 华北平原应对严重干旱事件的实证研究. 资源科学, 2016, 38(5): 900-908. [YANG Y, WANG J X, HUANG J K. The adaptive irrigation behavior of farmers and impacts on yield during extreme drought events in the North China Plain. Resource Science, 2016, 38(5): 900-908.]
- [39] 张茹, 刘水, 马璐瑶. 浅谈单井抽水的影响半径计算. 科技风, 2015, (10): 126. [ZHANG R, LIU S, MA L Y. Calculating the influence radius of single well. Technology Wind, 2015, (10): 126.]
- [40] SOPHOCLEOUS M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 52-67.
- [41] PELLI M, CHAKRAVORTY U, DENG X Z, et al. "Groundwater Depletion near Roads in the North China Plains" Working Paper (2017). <http://works.bepress.com/mpelli/8/>.
- [42] 布朗, 怀保光, 兰月. 地球不堪重负: 水位下降、气温上升时代的食物安全挑战. 国土资源情报, 2006, (1): 56-57. [BROWN, HUAI B G, LAN Y. The earth is overwhelmed: The food security challenge of the age of falling water and rising temperatures. Land and Resource Information, 2006, (1): 56-57.]
- [43] 李国祥. 2020年中国粮食生产能力及其国家粮食安全保障程度分析. 中国农村经济, 2014, (5): 4-12. [LI G X. China's grain production capacity and its national food security level analysis in 2020. Chinese Rural Economy, 2014, (5): 4-12.]
- [44] 国务院. 关于北方地区抗旱打井情况和今后意见的报告的通知. <http://www.chinalawedu.com/falvfagui/fg22016/327.shtml>. [The State Council. Notice on the situation of drought-resistant drilling in the north and the report of future opinions. <http://www.chinalawedu.com/falvfagui/fg22016/327.shtml>.]
- [45] 国务院. 关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见. [http://www.gov.cn/jrzq/2014-01/19/content\\_2570454.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2014-01/19/content_2570454.htm). [The State Council. Some opinions on deepening rural reform to accelerate agricultural modernization. [http://www.gov.cn/jrzq/2014-01/19/content\\_2570454.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2014-01/19/content_2570454.htm).]
- [46] 国务院. 关于加大改革创新力度加快农业现代化建设的若干意见. [http://www.gov.cn/zhengce/2015-02/01/content\\_2813034.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2015-02/01/content_2813034.htm). [The State Council. Some opinions on accelerating the reform and innovation to speed up the modernization of agriculture. [http://www.gov.cn/zhengce/2015-02/01/content\\_2813034.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2015-02/01/content_2813034.htm).]
- [47] 国务院. 关于落实发展新理念加快农业现代化实现全面小康目标的若干意见. [http://www.gov.cn/zhengce/2016-01/27/content\\_5036698.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2016-01/27/content_5036698.htm). [The State Council. Some opinions on the implementation of the new concept to accelerate agricultural modernization and achieve the goal of overall well-off society. [http://www.gov.cn/zhengce/2016-01/27/content\\_5036698.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2016-01/27/content_5036698.htm).]
- [48] 国务院. 关于深入推进农业供给侧结构性改革加快培育农业农村发展新动能的若干意见. [http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/05/content\\_5165626.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/05/content_5165626.htm). [The State Council. Some opinions on deepening the agricultural supply-side structural reform to accelerate the development of new drivers of agricultural and rural development. [http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/05/content\\_5165626.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2017-02/05/content_5165626.htm).]
- [49] 水利部, 国家发展改革委. "十三五"水资源消耗总量和强度双控行动方案. <http://www.jsjg.com.cn/Files/PictureDocument/20161111124523678952345697.pdf>. [Ministry of Water Resources, National Development and Reform Commission. The "13th five year" water resource consumption amount and intensity double control action plan. <http://www.jsjg.com.cn/Files/PictureDocument/20161111124523678952345697.pdf>.]

- [50] 水利部. 地下水管理条例: 征求意见稿. <http://www.h2o-china.com/news/258461.html>. [Ministry of Water Resources. Groundwater management ordinance: Draft. <http://www.h2o-china.com/news/258461.html>.]
- [51] 水利部. 机井技术规范. <https://zhidao.baidu.com/share/df03461d54d6d727d64b4d11e1205c5a.html>. [Ministry of Water Resources. Technical criterion for tube wells. <https://zhidao.baidu.com/share/df03461d54d6d727d64b4d11e1205c5a.html>.]

## Taking a perspective in externalities to analyze the effect of well density on groundwater table

GONG Ya-zhen<sup>1</sup>, GUAN Bao-zhu<sup>2,3</sup>, DAI Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>

(1. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Advanced Agricultural Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. National School of Development, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Rapid expansions of wells for irrigation water have led to severe groundwater depletion, posing serious challenge to future's food security in China. Finding solutions is critical for sustainable use of groundwater in China. As groundwater is a typical pool resource and its use gives rise to externalities, controlling well density could be a plausible solution. However, little empirical evidence is available in existing literature in China to analyze the relationship between well density and water tables. This paper therefore aims to fill in some of the gaps in existing literature using Lankao county in Henan province as a case study area. Based on household survey data and well census data, the paper conducts spatial analysis and econometric analysis to examine the relationship. It finds that there is a significant relationship between well density and groundwater tables. Specifically, for each increase in the number of surrounding wells within a radius of 100 m, the water table significantly decreases by 15 cm at a 5% significance level. Moreover, the marginal effect of well density on water table decreases significantly when the radius becomes larger and larger. Based on the findings, the paper emphasizes the importance of the government to control well density and develops a groundwater water permit system for sustainable management of groundwater in China.

**Keywords:** population, resources and environmental economics; externality; econometric model; well density; groundwater table