

# 石家庄平原区粮食施肥增产对地下水 开采量演变影响研究\*

刘中培<sup>1</sup> 张光辉<sup>2\*\*</sup> 严明疆<sup>2</sup> 王金哲<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院 郑州 450011; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所 石家庄 050061)

**摘要** 通过对近30年来石家庄平原区农业开采地下水量与化肥施用量和粮食产量之间的关系研究,揭示了化肥施用在小麦-玉米产量耗用地下水开采量中的影响作用。结果表明,化肥施用量增加使小麦-玉米产量的增幅大大超过农用地地下水开采量增幅,从而使单位小麦-玉米产量所耗用的地下水开采量不断减小,从20世纪70年代的 $1.86\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 减小到2000—2005年间的 $0.72\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。如果没有化肥的增产效用,按照20世纪70年代的化肥施用量水平( $0.17\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),达到现状的粮食生产规模需要耗用的地下水开采量将大大增加,20世纪80年代、90年代、2000—2005年间平均分别需要多耗用地下水 $10.35\times 10^8\text{ m}^3$ 、 $18.88\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $20.12\times 10^8\text{ m}^3$ 。但是21世纪初期单位面积上化肥施用量水平已较高,继续增加化肥施用对粮食单产及单位小麦-玉米产量耗用地下水强度影响不大。

**关键词** 石家庄平原区 化肥施用量 地下水开采量 地下水利用 小麦-玉米单产

**中图分类号:** P641.8; P343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)01-0111-05

## Impact of fertilization and high grain production on groundwater exploitation in Shijiazhuang Plain

LIU Zhong-Pei<sup>1</sup>, ZHANG Guang-Hui<sup>2</sup>, YAN Ming-Jiang<sup>2</sup>, WANG Jin-Zhe<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract** Shijiazhuang Plain is one of the main grain production areas in Hebei Province, cultivating mainly winter wheat and summer maize. Increased grain production in the plain is closely related with groundwater exploitation. This is because there is almost no surface runoff in the plain and winter wheat and summer maize cannot do well without irrigation. Generally, production increases with increasing groundwater exploitation. However, the rate of increase in grain production is bigger than that of groundwater recent years due to fertilization. Hence groundwater consumption intensity for wheat and maize yield is dropping. It is therefore critical to study the impact of fertilizer use on groundwater consumption in the agricultural sector. This paper analyzed the variations in groundwater exploitation for wheat and maize production. It also analyzed the effect of increased grain production on groundwater exploitation. Furthermore, the paper discussed the relationship between fertilizer use and per-unit wheat and maize yield. The results showed that increasing fertilizer use had led to decreasing groundwater exploitation for wheat and maize yield. While groundwater use was  $1.86\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$  in the 1970s, it dropped to  $0.72\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$  at the start of the 21<sup>st</sup> century. According to  $0.17\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  fertilizer use in the 1970s without considering yield-increasing effect of fertilization, groundwater exploitation sharp increased to get the total production levels of today. For example, groundwater exploitation respectively increased by  $10.35\times 10^8\text{ m}^3$ ,  $18.88\times 10^8\text{ m}^3$  and  $20.12\times 10^8\text{ m}^3$  in the 1980s, 1990s and 2000—2005. From the relationship between fertilizer use and per-unit wheat and maize yield, fertilizer use reached  $0.76\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  to have the max per-unit wheat and maize yield. In the early 21<sup>st</sup> century, however, fertilizer use per-unit area was  $0.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , which was close to the  $0.76\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  dose for max yield. Hence with increasing fertilizer use, there

\* 华北水利水电学院博士科研启动基金项目(2008023)、国家自然科学基金项目(41172214)、河南省重点科技攻关计划项目(112102110033)和河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011B170006)资助

\*\* 通讯作者: 张光辉(1959—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水循环演化与水资源持续利用研究。E-mail: huanjing@heinfo.net  
刘中培(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下水资源可持续利用研究。E-mail: liuzhongpei@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2011-03-16 接受日期: 2011-08-03

was little potential to increase production and decrease groundwater use.

**Key words** Shijiazhuang Plain, Fertilizer use, Groundwater exploitation, Groundwater use, Per-unit wheat and maize yield (Received Mar. 16, 2011; accepted Aug. 3, 2011)

石家庄平原区是河北省重要的粮食生产区域,灌溉发展早,农业生产水平较高,由于此区地表水资源量锐减,农业灌溉主要是靠抽取地下水,农田灌溉抽取地下水资源量占地下水开采量的80%以上。随着农业投资的增加,粮食单产也在不断提高,平均单产耗用地下水开采量呈现减小趋势。由于近30年来化肥施用量增加对提高粮食单产起了至关重要的作用,成为粮食产量增加的主要驱动因素<sup>[1-3]</sup>,因此,研究农田单位产量耗水的变化趋势及化肥施用量增加对其产生的影响,对正确制定农田粮食增产发展策略和区域地下水合理利用和调控都具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

在作物产量和水分关系研究方面,从20世纪60年代开始,许多学者从试验结果分析,提出了一系列作物产量与水分相互关系模型,如Jensen模型和Stewart模型等<sup>[5-6]</sup>。从宏观角度分析作物产量与农业耗水量或区域水资源量之间关系的研究较少。贾金生等<sup>[7]</sup>以河北省栾城县为例分析了农业产量的大幅度提高与地下水位下降的关系,指出一般情况下作物产量与需水量呈正比,汇制了粮食产量和平均地下水位关系的“X型”曲线。张光辉等<sup>[8-9]</sup>研究了农田粮食增产与灌溉节水对地下水开采量的影响,指出近50年来河北平原粮食持续大幅增产驱动了区内地下水开采量不断增大,而灌溉节水水平的提高有效缓解了地下水开采量增大的速率。本文在分析区域地下水位和粮食产量关系的基础上,结合化肥施用量增加在粮食产量增加过程中的巨大支撑作用,探讨施肥增产对地下水开采量演变的影响。

## 1 石家庄平原区概况

石家庄平原区位于东经 114°17'~115°22'、北纬 37°02'~38°03'之间,是滹沱河流域的一部分,为山前冲洪积平原,西靠太行山,东接平坦的河北中部平原,包括石家庄市、正定、栾城、行唐、高邑、深泽、无极、元氏、赵县、藁城、晋州、新乐 1 市 11 县(市),面积 6 673 km<sup>2</sup>,人口 478.7 万。气候属于大陆性季风气候,多年平均气温 12.8 °C;多年平均降水量 496.6 mm,降水年内分配极不均匀,多集中在 6—9 月,其降水量占年降水总量的 70%~80%;水面蒸发强烈,多年平均蒸发量为 1 992 mm<sup>[10]</sup>。

石家庄平原区粮食种植作物以小麦和玉米为主,冬小麦-夏玉米种植模式占农作物总播种面积的

80%以上,而冬小麦和夏玉米都是高耗水性作物,每年总需水量约为 800~900 mm,多年平均 496 mm 的降水量不能满足作物需求,必须补充灌溉,而灌溉主要是靠抽取地下水<sup>[11]</sup>。因此,随着小麦和玉米种植面积的扩大,粮食产量不断增加,相应地下水开采量也持续增加,地下水位下降。

20 世纪 70 年代,石家庄平原区小麦-玉米种植面积平均为 35.20×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,总产量平均为 158.50×10<sup>4</sup> t,小麦-玉米平均单位产量耗用地下水开采量为 1.86 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>。至 2000—2005 年间,小麦-玉米种植面积增长为 42.80×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,总产量达到 310.20×10<sup>4</sup> t<sup>[12]</sup>,分别比 20 世纪 70 年代增长 21.6%和 95.7%。相应地,农业地下水开采量也不断加大,但增长幅度小于小麦-玉米总产量增幅,所以平均单位产量耗用地下水开采量呈减小趋势,2000—2005 年间平均为 0.73 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>。

## 2 数据来源和研究方法

本文计算分析时选用的农作物产量数据、种植面积数据,以及化肥施用量数据均来自《石家庄农村统计年鉴》<sup>[12]</sup>,收集了从 1973—2005 年共 33 年的数据资料。地下水开采量相关数据来源于河北省水文水资源局统计资料及《河北省水资源公报》<sup>[13]</sup>,数据资料选取与农业相关数据选取年份一致,同为 1973—2005 年。

本文中农业地下水开采量、小麦-玉米总产量以及化肥施用量之间的关系运用 SPSS 软件中相关分析法进行分析计算。根据相关分析拟合结果判断地下水开采量随小麦-玉米总产量增加的演变规律以及小麦-玉米平均单产随单位面积化肥施用量增加的变化规律。在施肥增产对地下水开采量影响机理分析时,把 1973—2005 年共 33 年时间分为不同年代进行对比分析,按照参考年代化肥施用量水平和耗水强度,将达到下一年代粮食产量时需要耗用的地下水开采量与实际开采量进行对比,揭示施肥增产对地下水开采量的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 近 30 年来粮食生产耗用地下水开采量及强度演变特征

粮食生产耗用地下水强度是指在主要利用地下水灌溉的地区,年农用地地下水开采量与粮食总产量

的比值,是综合反映灌溉用水水平和粮食生产状况的指标<sup>[4]</sup>。由于石家庄平原区小麦和玉米是主要的耗水型作物,并且总种植面积和产量均占粮食种植面积和产量的85%以上,因此可用小麦-玉米平均单位产量耗用地下水开采量作为衡量粮食生产能力和节水程度的指标。

在粮食产量逐年增加的同时,粮食生产灌溉耗用的地下水开采量也在不断增大。近 30 年来虽然石家庄平原区农用地地下水开采量总体呈递增趋势,但是单位粮食生产所耗用的地下水开采量却在不断减小(图 1)。小麦-玉米平均单位产量耗用地下水强度在 20 世纪 70 年代最高,为  $1.86 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,至 20 世纪 90 年代降为  $0.75 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,2000—2005 年间小麦-玉米平均单位产量耗用地下水强度波动很小,平均为  $0.73 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

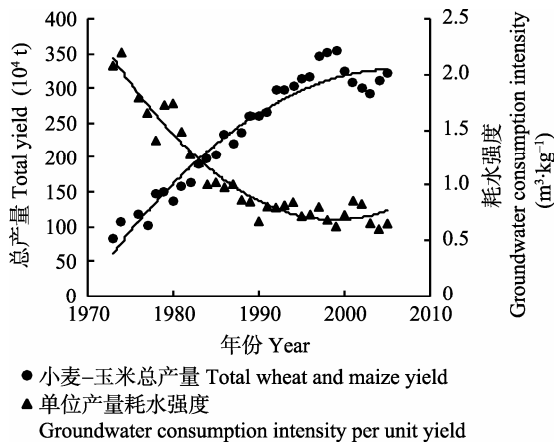


图 1 1973—2005 年小麦-玉米年总产量和单位产量耗用地下水强度的变化

Fig. 1 Dynamics of total wheat and maize yield and groundwater consumption intensity per unit yield from 1973 to 2005

1973—1979 年,小麦-玉米总产量平均为  $118.00 \times 10^4 \text{ t}$ ,农业开采地下水量为  $21.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12-13]</sup>;单位小麦-玉米生产耗用地下水开采量为  $1.86 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。

20 世纪 80 年代,小麦-玉米总产量为  $199.00 \times 10^4 \text{ t}$ ,农业开采地下水量为  $21.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12-13]</sup>,相对于 20 世纪 70 年代期间分别增加了 68.6%和 2.0%;而

单位小麦-玉米生产耗用地下水开采量从  $1.86 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  减小到  $1.10 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,下降幅度为 40.9%。

进入 20 世纪 90 年代,小麦-玉米种植面积继续扩大,产量仍有大幅提高,从  $199.00 \times 10^4 \text{ t}$  增加到  $309.16 \times 10^4 \text{ t}$ ,农业平均开采地下水相应增加为  $23.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[12-13]</sup>,比 20 世纪 80 年代分别增加 55.4%和 6.3%;而单位小麦-玉米生产耗用地下水开采量平均为  $0.75 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,减小 31.8%。

2000—2005 年期间,小麦-玉米总种植面积有所减小,从 20 世纪 90 年代的  $46.10 \times 10^4 \text{ hm}^2$  减小到  $42.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,总产量基本不变,为  $310.25 \times 10^4 \text{ t}$ <sup>[12]</sup>。农业灌溉开采地下水量减小到  $22.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>,单位小麦-玉米生产耗用地下水强度平均为  $0.72 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均比 20 世纪 90 年代有所减小,减幅分别为 3.8%和 4%。

### 3.2 施肥增产对农业开采量演变影响机理

#### 3.2.1 小麦-玉米总产量与地下水开采量的关系

水和肥料是保障粮食稳产高产的必要条件,近 30 多年来,石家庄平原区农业投入不断增加,灌溉水利设施基本得到保障,在作物缺水阶段可通过开采地下水进行灌溉来弥补作物水分亏缺。虽然开采地下水灌溉量的大小受到降水量及其时空分布、土壤墒情、灌溉效率提高以及其他农业节水措施的影响,但在作物种植规模扩大过程中,地下水农用开采量总体上随种植面积及产量的扩大而不断增加。1956—1959 年期间地下水农用开采量为  $9.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,20 世纪 70 年代初为  $17.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,至 21 世纪初已增至  $23.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>。

图 2 反映了小麦-玉米总产量和农用地地下水开采量之间的关系,由于小麦和玉米均属于高耗水性作物,所以随着产量( $W_{\text{小麦-玉米}}$ )不断提高,地下水开采量( $Q$ )持续增大,两者呈抛物线变化,关系式为  $Q = -0.0002W_{\text{小麦-玉米}}^2 + 0.1205W_{\text{小麦-玉米}} + 6.7908$  ( $R^2 = 0.8644$ )。

表 1 1973—2005 年不同时段小麦-玉米总产量、农用地地下水开采量及强度变化

Table 1 Variations of total wheat and maize yield, amount and intensity of agricultural groundwater exploitation in different periods from 1973 to 2005

时段 Period	小麦-玉米总产量 Total wheat and maize yield ( $10^4 \text{ t}$ )	变化幅度 Variation range (%)	农业开采地下水 Agricultural groundwater exploitation amount ( $10^8 \text{ m}^3$ )	变化幅度 Variation range (%)	耗用地下水强度 Groundwater consumption intensity ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	变化幅度 Variation range (%)
1973—1979	118.00	—	21.44	—	1.86	—
1980—1989	199.00	+68.6	21.87	+2.0	1.08	-41.9
1990—1999	309.16	+55.4	23.24	+6.3	0.75	-31.8
2000—2005	310.25	+0.4	22.35	-3.8	0.72	-4.0

“+”表示较前一阶段增大 “+” means greater than the previous decade; “-”表示较前一阶段减小 “-” means smaller than the previous decade.

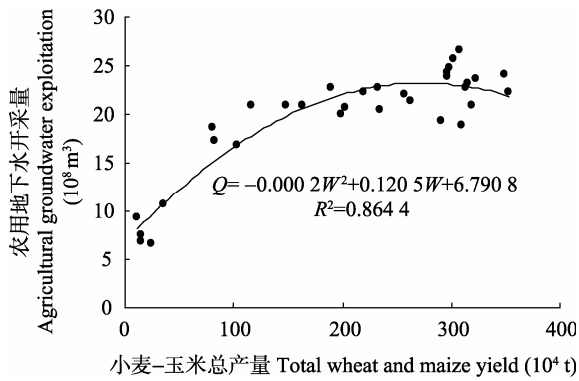


图2 1973—2005年小麦-玉米产量与农用地下水开采量关系

Fig. 2 Relationship between total wheat and maize yield and agricultural groundwater exploitation amount from 1973 to 2005

3.2.2 肥料施用量与小麦-玉米产量之间的关系

作物灌溉保证程度的增加促进了粮食增产，而肥料施用量的增加在粮食增产过程中也发挥了至关重要的作用。石家庄平原区在近30年时间内化肥施用量不断增加，从20世纪70年代平均总量 $8.18 \times 10^4$  t、单位面积施肥量 $0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，增长到2000~2005年期间平均的 $34.54 \times 10^4$  t和 $0.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  [12]，分别是20世纪70年代平均值的4.22倍和4.18倍。随着化肥施用量增加，小麦-玉米产量迅速提高，平均单产水平增长到原来的2.18倍。

图3反映了单位种植面积上化肥施用量与小麦-玉米平均单位产量之间的关系，随着单位面积化肥施用量( $W_{化}$ )的增加，小麦-玉米平均单产( $P$ )不断增大，但增长趋势逐渐趋于平缓。总体上两者之间呈现抛物线型变化，关系式为 $P = 0.791 + 17.319W_{化} - 11.383W_{化}^2$  ( $0 < x < 0.761$ )，两者相关关系密切， $R^2 = 0.91$ 。

单位面积化肥施用量的增加提高了粮食单产，

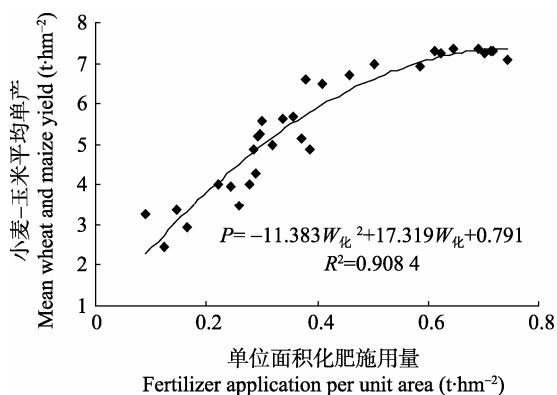


图3 1973—2005年小麦-玉米平均单产与化肥施用量关系  
Fig. 3 Relationship between mean wheat and maize yield per unit area and fertilizer application rate from 1973 to 2005

有利于粮食总产量的提高，但另一方面，石家庄平原区小麦-玉米种植面积在近30年内也呈不断增加趋势，从20世纪70年代的 $35.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到2000—2005年间平均的 $42.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$  [12]，即单产增加和小麦-玉米种植面积的变化共同促进了石家庄平原区小麦-玉米总产量的提高。

3.2.3 施肥增产对地下水开采量影响机理

从化肥施用量对小麦-玉米产量的影响作用以及产量与农用地下水开采量的关系综合分析可知，研究区近30年来化肥施用量的增加及种植面积的扩大促使小麦-玉米总产量增大，小麦-玉米总产量增加驱动农业开采地下水量增加。但是化肥施用量的增加使小麦-玉米总产量增加的幅度远远大于地下水开采量增加的幅度(表1)，从而使小麦-玉米平均单位产量耗用地下水强度呈现不断减小趋势。

20世纪80年代，单位粮食种植面积上化肥施用量为 $0.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，比20世纪70年代增加86.1%，由于化肥施用量增加引起小麦-玉米单产增加 $1.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图3，表2)。如按20世纪70年代 $0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的化肥施用量水平，则20世纪80年代小麦-玉米平均单产为 $3.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，单位产量耗水强度为 $1.60 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，达到 $199.0 \times 10^4$  t的小麦-玉米生产总量，需要多耗地下水约 $10.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。进入20世纪90年代，单位粮食种植面积上化肥施用量为 $0.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，由于化肥施用量增加引起小麦-玉米单产增加 $1.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。按20世纪80年代 $0.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥施用量水平，则小麦-玉米平均单产为 $5.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，达到20世纪90年代的实际生产规模，需要多耗地下水 $8.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000—2005年期间，单位面积化肥施用量明显增加，达到 $0.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，由于化肥施用量增加引起小麦-玉米单产增加 $0.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。按20世纪90年代 $0.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥施用量水平，则小麦-玉米平均单产为 $6.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，单位产量耗水强度为 $0.76 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，达到2000—2005年间的小麦-玉米总产量，需要多耗地下水 $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。如果以1973—1979年间单位作物种植面积化肥施用量 $0.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水平计算，则20世纪80年代、90年代、2000—2005年间分别需要多耗地下水 $10.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $18.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $20.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.3 施肥增产对农业开采量影响趋势分析

从图3可知，小麦-玉米平均单产与单位面积化肥施用量之间的变化关系式为 $y = 0.791 + 17.319x - 11.383x^2$  ( $0 < x < 0.761$ ,  $R^2 = 0.91$ )，当单位面积化肥施用量为 $0.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时，小麦-玉米单产达到最大值，为 $7.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 2 1973—2005 年不同时段小麦—玉米化肥施用量增加引起的耗水强度变化量及节水量

Table 2 Varied groundwater consumption intensity and water saving amount caused by increased fertilizer application of wheat and maize in different periods from 1973 to 2005

时段 Period	小麦—玉米单产 Wheat-maize yield per unit (t·hm <sup>-2</sup> )	单位面积化肥施用量 Fertilizer application amount per unit area (t·hm <sup>-2</sup> )	化肥引起单产增量 Increased yield by fertilizer application (t·hm <sup>-2</sup> )	单产耗水减小量 Decrease of groundwater con- sumption per unit yield (m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	节水量 Water saving amount (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
1973—1979	3.33	0.17	—	—	—
1980—1989	4.77	0.31	1.13	0.78	10.35
1990—1999	6.69	0.49	1.55	0.32	8.53
2000—2005	7.24	0.72	0.77	0.03	1.24

由于 2000—2005 年间, 化肥施用量波动很小, 介于  $34.00\sim 34.95\times 10^4$  t 之间, 单位种植面积化肥施用量平均为  $0.72\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 单产也相对稳定, 平均  $7.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 基本接近理想最大产量  $7.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。如按 2005 年的种植结构, 继续增加化肥施用量使之达到  $0.76\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  (化肥施用总量增加  $1.95\times 10^4$  t), 其他条件不变时, 小麦—玉米平均单产达到  $7.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 总产量将增加  $5.68\times 10^4$  t, 比 2000—2005 年间平均产量增幅仅为 1.84%。按照 2000—2005 年间小麦—玉米耗用地下水强度  $0.72\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$  计算, 如果不通过增加化肥施用量而实现小麦—玉米总产量增加  $5.68\times 10^4$  t, 需多耗地下水  $0.41\times 10^8\text{ m}^3$ 。

因此, 在现状种植结构、作物品种及化肥利用效率等条件保持不变的情况下, 继续提高单位种植面积化肥施用量来提高粮食单产水平, 从而使地下水耗水强度减小的潜力不大。

#### 4 结论

(1) 近 30 年来化肥施用量增加是驱动粮食产量增大的主要动因, 粮食产量增加使地下水开采量增大, 但化肥的主导作用使粮食产量增幅大于地下水开采量增幅, 所以单位产量耗用地下水强度不断减小, 从 20 世纪 70 年代的  $1.86\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$  减小到 21 世纪初期的  $0.72\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。如果没有单产耗水量的减小, 地下水资源早已无法支撑现今的粮食生产规模。

(2) 化肥施用量增加使小麦—玉米平均单产水平不断提高, 单位小麦—玉米生产所耗用的地下水强度减小, 从而节约了农用地下水开采量。以 1973—1979 年间化肥施用量  $0.17\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  计算, 达到 20 世纪 80 年代、90 年代和 2000—2005 年间的实际生产规模, 需多耗地下水农用开采量约  $10.35\times 10^8\text{ m}^3$ 、 $18.88\times 10^8\text{ m}^3$  和  $20.12\times 10^8\text{ m}^3$ 。

(3) 虽然化肥施用量对粮食产量的增加效用使单产耗水量大幅减小, 但 21 世纪初期单位面积化肥施用量水平基本达到计算临界值, 继续增加化肥施用

量对产量增加及单产耗水减小的潜力均不大, 小麦—玉米总产量增加的潜力约为  $5.68\times 10^4$  t, 如果不通过增加化肥施用量而实现增产  $5.68\times 10^4$  t, 需多耗地下水  $0.41\times 10^8\text{ m}^3$ 。

#### 参考文献

- [1] 杜群, 欧阳竹. 淮北砂姜黑土区小麦单产变化及影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1434–1438
- [2] 谢迎新, 王小明, 王化岑, 等. 无机与有机肥配施对小麦籽粒产量和淀粉糊化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(2): 299–302
- [3] 张瑞华, 罗天成, 李英, 等. 生态肥与化肥配施对小麦生长发育及产量的效应研究[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2007, 10(2): 19–23
- [4] 王建生, 徐子恺, 姚建文. 单位水量粮食生产能力分析[J]. 水科学进展, 1999, 10(4): 429–434
- [5] Jensen M E. Water consumption by agricultural plants[M]// Kozlowski T T, ed. Water deficits and plants growth. New York: Academic Press, 1968: 1–22
- [6] Stewart J I, Hagan R M. Functions to predict effects of crop water deficits[J]. J Irrig Drain Div, ASCE, 1973, 99(4): 421–439
- [7] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算——以河北省栾城县为例[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 201–209
- [8] 张光辉, 费宇红, 严明疆, 等. 灌溉农田节水增产对地下水开采量影响研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 350–355
- [9] 张光辉, 费宇红, 王惠军, 等. 河北省平原区农田粮食增产与灌溉节水对地下水开采量的影响[J]. 地质通报, 2009, 28(5): 645–650
- [10] 李驾三, 许有鹏. 石家庄东部平原区地下水资源合理利用与保护问题的探讨[J]. 资源科学, 1986, 8(4): 10–17, 9
- [11] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 太行山前平原农田高效用水模式研究[J]. 生态农业研究, 1999, 7(3): 22–26
- [12] 石家庄市统计局, 国家统计局石家庄调查队. 石家庄农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1973–2005
- [13] 河北省水利厅. 河北省水资源公报[M]. 1991–2002