

# 华北平原典型井灌区地下水保障能力空间差异

王电龙<sup>1,2</sup>, 张光辉<sup>1</sup>, 冯慧敏<sup>1,3</sup>, 田言亮<sup>1</sup>, 王金哲<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050800; 2. 山西省水利建设开发中心, 太原 030002;  
3. 山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:** 作为我国重要的粮食生产基地, 华北平原的最主要灌溉水源是地下水。但是, 从山前平原到滨海平原, 该区地下水资源量差异巨大。为了揭示华北平原典型井灌区粮食生产地下水保障能力的差异, 以山前平原保定、中部平原德州和滨海平原沧州地区井灌区为典型研究区, 建立了地下水保障能力评价指标体系, 并利用彭曼公式计算了粮食作物灌溉需水量, 利用概率统计的方法分析了三个典型地区的地下水保障程度。研究结果表明: 保定地区的粮食生产多年平均地下水保障能力为中等水平, 德州和沧州地区均处于极弱水平; 地下水保障程度随降水量增大呈直线增大, 降水量每增加 100 mm, 保定地区保障程度增加 4.9%, 德州地区增加 1.6%, 沧州地区增加 0.6%; 未来 50 年 (2011 年- 2060 年), 保定、德州和沧州地区的地下水保障程度均符合对数正态分布, 其中保定地区主概率对应中等水平, 概率水平为 0.726, 德州和沧州地区主概率均对应极弱水平, 发生概率分别为 0.577 和 1。

**关键词:** 华北平原; 井灌农业区; 粮食生产; 彭曼公式; 需水量; 地下水; 保障程度

**中图分类号:** TV211.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0622-04

## Spatial variation of groundwater guarantee extent in typical well irrigation area of North China Plain

WANG Dianlong<sup>1,2</sup>, ZHANG Guanghui<sup>1</sup>, FENG Hui min<sup>1,3</sup>, TIAN Yanliang<sup>1</sup>, WANG Jinzhe<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;

2. Shanxi Water Conservancy Construction & Development Center, Taiyuan 030002, China;

3. China Forestry College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** North China Plain (NCP) is an important grain production base in China, and groundwater is the main irrigation water resource. However, groundwater resource has significantly spatial variation. In order to reveal the spatial variation of groundwater guarantee extent for grain production in NCP, an evaluation index system of groundwater guarantee extent was developed on the basis of three typical regions including Baoding of pediment plain, Dezhou of central plain, and Cangzhou of coastal plain. The crop water requirements in the three typical regions were calculated using Penman equation, and groundwater guarantee extents were analyzed using the statistical evaluation method. The results indicated that the annual average groundwater guarantee extent for grain production is the middle level in Baoding while the inferior level in Dezhou and Cangzhou; groundwater guarantee extent increases with the increasing of precipitation, and it can increase by 4.9% in Baoding, 1.6% in Dezhou, and 0.6% in Cangzhou with the increasing of 100 mm precipitation; and groundwater guarantee extents of Baoding, Dezhou, and Cangzhou are in the logarithmic normal distribution in the future 50 years (2011 to 2060), and the main probability of Baoding corresponds to the middle level with the probability of 0.726 while the main probability of Dezhou and Cangzhou corresponds to the extremely inferior level with the probability of 0.577 and 1, respectively.

**Key words:** North China Plain; well irrigation area; grain production; Penman equation; water requirement; groundwater; guarantee extent

华北平原是我国重要的粮食生产基地, 粮食年产量达 5 700 万 t/a, 在《全国新增 500 亿 kg 粮食生产能力规划》

收稿日期: 2014-10-25    修回日期: 2014-12-23    网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.0910.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172214); 中国地质调查局地质大调查项目(1212011220941); 山西农业大学科技创新基金项目(201306)

作者简介: 王电龙(1981-), 男, 山东安丘人, 工程师, 博士生, 主要从事农田水利与水资源合理利用研究, E-mail: fenghuimin1997@163.com

通讯作者: 张光辉(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 二级研究员, 博士生导师, 主要从事区域水循环与地下水可持续利用研究, E-mail: Huanjing@heinfo.net

(2009年-2020年)中,黄淮海平原区(华北平原占46.3%)承担新增粮食产能指标164.5亿kg,占全国新增产能的32.9%。因此,华北平原粮食的高产稳产,对我国粮食安全有着极其重要的意义。另一方面,华北平原又是我国地下水超采最为严重的地区,已经形成了石家庄漏斗、保定漏斗和邯郸漏斗等地下水降落漏斗群,漏斗面积超过9700km<sup>2</sup>。在地下水开采用户中,农业开采量占华北平原总开采量的65%以上<sup>[1]</sup>。

降水是影响农业灌溉地下水开采的重要因素,降水量的减少不仅造成农业地下水开采量的大幅增加,地下水位的持续下降<sup>[2-5]</sup>,而且对粮食生产安全构成极大威胁。目前关于灌溉与地下水开采的研究多集中在降水变化、粮食产量与地下水开采的互动关系上<sup>[6-14]</sup>,而对于在现在气候条件的地下水可开采量对粮食生产的保障能力究竟有多大,国内外研究相对较少。

华北平原地下水资源空间分布差异很大,从山前平原到滨海平原地下水资源呈减小趋势,例如山前平原保定地区多年平均地下水可开采量为28.01亿m<sup>3</sup>,德州地区为11.34亿m<sup>3</sup>,沧州地区为6.61亿m<sup>3</sup>,以这3个地区为典型地区,研究华北平原井灌区地下水保障能力的空间差异具有一定的代表性。本文选取华北山前平原保定地区、中部平原德州地区和滨海平原沧州地区作为典型研究区,建立了粮食生产地下水保障能力评价指标体系,并应用相关分析、概率统计等研究方法,分析评价了未来50年(2011年-2060年)华北平原典型井灌区粮食生产地下水保障能力的空间差异性,旨在为该区域乃至全国粮食生产安全的水资源保障提供一定的理论支持。

## 1 研究区概况

华北平原东临渤海海岸线,西至太行山前100m地面等高线,南起黄河,北至燕山山脉50m地面等高线,从山麓到渤海海岸可分为山前冲积洪积倾斜平原(山前平原)、中部冲积湖积平原(中部平原)、东部冲积海积滨海平原(滨海平原),共涉及21个市207个县,总面积达13.9万km<sup>2</sup>,总人口1.33亿人,多年平均降水量为538.1mm。区内粮食种植模式为冬小麦和夏玉米一年两季轮作种植,灌溉用水以开采地下水为主。区内主要水系为海滦河水系和黄河中下游水系。

山前平原由河流冲积扇连接而成,平原上部为单含水层结构,岩性主要为砾卵石、中粗砂含砾石中粗砂和中细砂,上下水力联系好;山前平原下部、中部和滨海平原可分为4个含水层,含水层岩性颗粒由山前到滨海逐渐变细,其中第Ⅱ和第Ⅰ含水层是潜水含水层,为该区农业用水主要开采层,第Ⅲ和第Ⅳ层是承压含水层。降水入渗补给为该区主要地下水补给来源,开采为主要地下水排泄项。

## 2 研究方法 & 数据来源

本文所述地下水保障程度是指在井灌区尺度上多年平均地下水可开采量能满足粮食作物生长需水量的程度。采用 $P_{gwi}$ 指标作为评估华北平原典型井灌区粮食主产地下水保障能力(程度)的技术指标:

$$P_{gwi} = \frac{Q_{gr}}{\alpha IR} \times 100 \quad (1)$$

式中: $Q_{gr}$ 为井灌区尺度上地下水可开采资源量(mm); $IR$ 为典型井灌区农业灌溉需水量(mm); $\alpha$ 为多年平均实际灌溉水量与计算灌溉需水量的比值,本文实际灌溉水量采用河北省(DB 13/T 1161.1-2009)和山东省(DB 37/T 1640-2010)发布的50%年份标准灌溉定额。

对于一个区域或流域而言, $Q_{gr}$ 为多年平均地下水可开采量减去区域(流域)内工业、生态及生活等行业所需要开采的水量;对于典型井灌区尺度来说, $Q_{gr}$ 为农田尺度上多年平均地下水补给量减去不可夺取的地下水量。本文采用《华北平原地下水可持续利用调查评价》成果中的区域地下水可开采模数,山前平原保定地区为254.8mm,中部平原德州地区为109.5mm,滨海平原沧州地区为47mm。

$P_{gwi}$ 指标的评估分级及其评价指标体系,见表1。

表1 华北平原井灌区地下水保障能力评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of groundwater guarantee extent in the well irrigation area of NCP

地下水资源保障能力状况	$P_{gwi}$ 指标(%)
很强	> 100
强	90~ 100
中	70~ 90
弱	30~ 70
极弱	< 30

采用彭曼-蒙蒂斯(Penman Monteith)公式计算粮食作物需水量。

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + R \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34 U_2)} \quad (2)$$

式中: $ET_o$ 为参照作物需水量(mm); $R_n$ 为地表净辐射(MJ·m<sup>-2</sup>); $G$ 为土壤热通量(MJ·m<sup>-2</sup>); $T$ 为2m高处日平均气温(°C); $u_2$ 为2m高处风速(m·s<sup>-1</sup>); $e_s$ 为饱和水气压(kPa); $e_a$ 为实际水气压(kPa); $\Delta$ 为饱和水气压曲线斜率(kPa·°C<sup>-1</sup>); $r$ 为干湿表常数(kPa·°C<sup>-1</sup>)。

$ET_o$ 的计算过程在联合国粮农组织(FAO)研发的ET<sub>o</sub> Calculator V32软件上实现,所需基础计算参数逐日降水量、最高气温、最低气温及日照时数等由中国国家气候中心研制的NCC/GU-WG(2.0)天气发生器软件生成(该软件由国家气候中心根据全国671个气象站点1961年-2000年的逐日气象资料率定研制,具有较高的精度,软件操作比较方便,直接选用相应模拟站点,然后点击输出按钮即可),空气湿度(%)选用ET<sub>o</sub> Calculator V32软件自带的 $T_{dew} = T_{min} + 2$ °C按钮,风速(m/s)选用“light to moderate wind”按钮,保定和德州地区选用“interior location”按钮,沧州地区选用“at the coast”按钮。

粮食作物灌溉需水量采用公式(3)计算:

$$IR = K_c \cdot ET_o - P_e \quad (3)$$

式中: $IR$ 为灌溉需水量(mm); $K_c$ 为作物需水系数,采用刘钰<sup>[19]</sup>等的实测数据; $P_e$ 为作物生育期内有效降水量(mm)。

作物生育期内有效降水量( $P_e$ )采用公式(4)计算,计算时间单元为旬。

$$P_c = \begin{cases} P & P \leq K_c \cdot ET_0 \\ ET_0 & P > K_c \cdot ET_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P$  为作物生育期内降水量(mm)。

### 3 研究成果

#### 3.1 降水变化对不同区位井灌区地下水保障程度的影响

由 NCC/GU-WG(2.0) 天气发生器软件生成上述气象资料后, 首先由公式 (2) 计算得到农作物潜在蒸发量( $ET_0$ ), 再由公式 (4) 计算得到有效降水量( $P_c$ ), 然后由公式 (3) 计算得到农作物灌溉需水量( $IR$ ), 最后由公式 (1) 计算得到粮食生产地下水保障程度( $P_{gwi}$ )。保定、德州和沧州地区粮食作物需水量、灌溉需水量和地下水保障程度的计算结果见表 2, 其中粮食作物需水量与灌溉需水量与李新波<sup>[17]</sup> 等人的研究成果基本一致。可以看出, 未来 50 年保定地区多年平均粮食生产地下水保障水平为中等水平, 平均每年需超采 44.4 mm 地下水来补充粮食作物灌溉; 德州地区处于极弱保障水平, 平均每年需超采 260.8 mm 补充灌溉; 沧州地区亦处于极弱保障水平, 平均每年需超采地下水 239.6 mm 来补充灌溉。分析认为, 地下水可开采量偏低是造成德州和沧州地区保障程度低的主要原因。

表 2 典型井灌区粮食作物地下水保障程度

Tab. 2 The groundwater guarantee extent for grain crop in the typical well irrigation area

地区	需水量/mm	灌溉需水量/mm	可开采量/mm	保障程度(%)
保定	1107.34	717.14	254.8	85.17
德州	1105.25	692.68	109.5	29.57
沧州	1184.31	686.32	47.0	16.40

从年降水量和年地下水保障程度的相关关系(见图 1)可以看出, 两者之间存在明显的线性关系: 降水量每增加 100 mm, 保定地区保障程度增加 4.9%, 德州地区增加 1.6%, 沧州地区增加 0.6%。

#### 3.2 不同区位井灌区地下水保障程度概率水平

精确评估华北平原不同区位井灌农业区未来(2011 年-2060 年)粮食生产地下水保障程度发生的概率水平, 对指导当地农业生产, 确定合理的地下水开采规模具有重要的现实意义。为了估计地下水保障程度( $P_{gwi}$ )的分布形态, 利用 NCC/GU-WG(2.0) 天气发生器各生成 10 组保定、德州和沧州地区 2011 年-2060 年逐日最高气温、最低气温、日照时数和降水量等气象数据, 利用公式 (1) - 公式 (4) 可计算得到 10 组 2011 年-2060 年保定、德州和沧州地区井灌农业区的地下水保障程度; 运用 MATLAB (R2014a) 的“Distribution fitting”工具对地下水保障程度( $P_{gwi}$ )进行变量分布估计; 然后对每种可能的分布类型进行  $\chi^2$  拟合优度检验, 最终确定保定、德州和沧州地区井灌农业区地下水保障程度( $P_{gwi}$ ) 在 0.05 显著水平上均符合对数正态分布(图 2), 其概率密度曲线参数见表 3。

从图 2 可以看出, 从沧州地区、德州地区到保定地区, 累积概率曲线明显向右偏移, 说明从滨海平原到山前平原, 强保障水平的概率呈增大趋势, 弱保障水平概率则呈减小趋势。从评价指标来看(表 4), 保定地区发生很强保障水平概率为 0.032(30 年一遇), 此时年实际灌溉水量小于地下水可

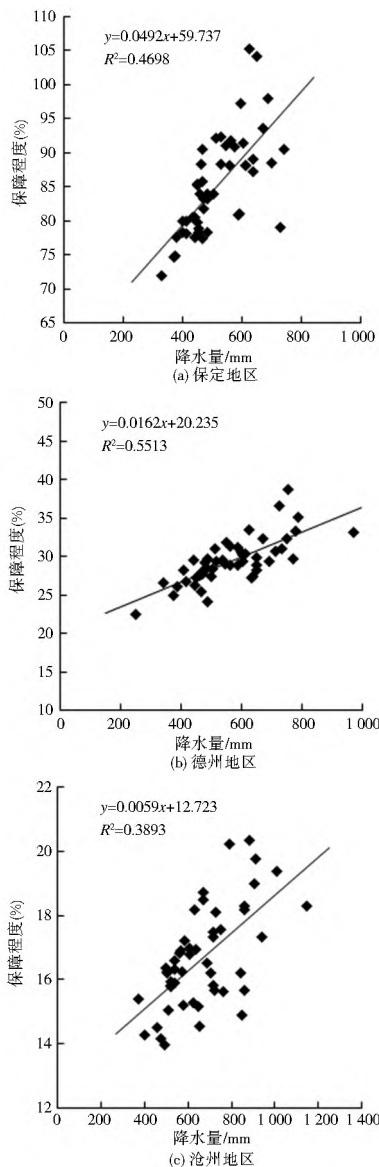


图 1 降水量与地下水保障程度关系

Fig. 1 Relationship between precipitation and groundwater guarantee extent

开采量, 不需超采地下水进行灌溉; 发生强保障水平的年份约为 11 a; 发生中保障水平的年份约为 36 a, 平均每年需超采 30~110 mm 地下水进行灌溉; 发生弱保障水平的概率为 0.015(66 年一遇), 平均需超采 110~595 mm 地下水(用地下水可开采量除以保障程度再减去地下水可开采量得到)。德州地区的地下水保障水平均处于弱和极弱水平, 发生弱保障水平的概率高达 0.423(2.5 年一遇), 平均需超采 47~255 mm 地下水; 发生极弱保障水平的年份约为 29 a, 每年至少需要超采 255 mm 地下水进行灌溉。沧州地区未来 50 年的粮食生产地下水保障水平均处于极弱水平, 即每年都至少需要超采 200 mm 地下水进行补充灌溉。

表 3 地下水保障程度概率密度曲线参数

Tab. 3 The parameter of PDF of groundwater guarantee extent

地区	均值	均方差	显著水平
保定	4.44	0.089	0.05
德州	3.38	0.101	0.05
沧州	2.79	0.089	0.05

由以上分析可以看出,山前平原保定地区的粮食生产地下水保障能力远高于中部平原德州地区和滨海平原沧州地区,积极发展节水措施,提高农田灌溉节水水平,同时引进客水进行渠灌是解决保定地区地下水超采形势的有效措施;但是对于德州地区和沧州地区而言,由于地下水保障水平极低,仅靠节水措施根本无法实现地下水的采补平衡,引进替代水源、改井灌为渠灌才是解决该地区地下水超采形势的治本之策。

表 4 井灌农业区地下水保障程度概率水平

Tab. 4 Probability of groundwater guarantee extent in the well irrigation area

地区	缺水程度	概率水平
保定	很强	0.032
	强	0.227
	中	0.726
	弱	0.015
	极弱	0
德州	很强	0
	强	0
	中	0
	弱	0.423
	极弱	0.577
沧州	很强	0
	强	0
	中	0
	弱	0
	极弱	1

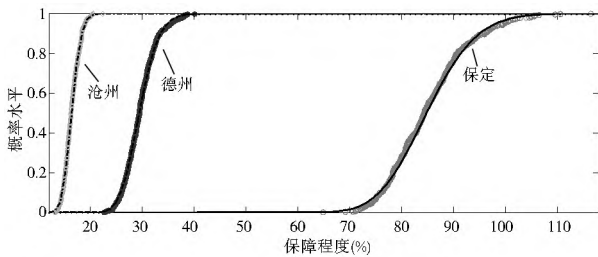


图 2 不同井灌农业区保障程度累计概率曲线

Fig. 2 Cumulative probability of guarantee extent in different well irrigation areas

### 4 结论

运用相关分析及统计评价等研究方法对华北平原保定、德州和沧州地区典型井灌区的粮食生产地下水保障能力进行了分析评价,主要得到以下几点结论:保定地区的粮食生产多年平均地下水保障能力为 85.17%,处于中等水平,未来 50 年中平均每年需超采地下水 44.4 mm 来补充灌溉;德州和沧州地区均处于极弱保障水平,保障能力分别为 29.57% 和 16.40%,平均每年需超采地下水 260.8 mm 和 239.6 mm;随着降水量的增大,保定、德州和沧州地区的地下水保障程度均呈直线增大;未来 50 年(2011 年-2060 年),保定、德州和沧州地区的地下水保障程度均符合对数正态分布,其中保定地区主概率对应中水平,发生年份约为 36 a,德州和沧州地区主概率均对应极弱水平,发生年份分别为 26 a 和 50 a。

### 参考文献(References):

[1] 张光辉,费宇红,王金哲,等.华北平原农业与地下水适应性研究[M].北京:科学出版社,2012.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, WANG Jirzhe, et al. An adaptation study between agriculture and groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))

[2] 田冰,孙宏勇,贾金生.河北山前平原地下水动态变化及其驱动因素分析[J].灌溉排水学报,2007,26(4):98-101.(TIAN Bing, SUN Hongyong, JIA Jirsheng. Analysis of the Groundwater System Change and Driving Factors in Hebei Piedmont [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(4): 98-101. (in Chinese))

[3] Yurkun HU, Juana Paul Moiw, Yonghui YANG, et al. Agricultural water saving and sustainable ground water management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain[J]. Journal of Hydrology 393(2010): 219-232.

[4] AHMED I, UMAR R. Groundwater flow modelling of Yamuna Krishnainterstream, a part of central Ganga Plain Uttar Pradesh [J]. Earth Syst. Sci., 2009, 118(5), 507-523.

[5] XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper yellow river basin [J]. Water Resource Manage, 2011 (25): 2035-2059.

[6] 张光辉,费宇红,刘克岩,等.华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应[J].水科学进展,2006,17(1):43-48.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, LIU Keyan, et al. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 43-48. (in Chinese))

[7] 张光辉,费宇红,杨丽芝,等.地下水补给与开采量对降水变化响应特征:以京津以南河北平原为例[J].地球科学,2006,31(6):879-884.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, YANG Lizhi, et al. Responses of groundwater recharge and pumpage to change in precipitation in Hebei plain [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 879-884. (in Chinese))

[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.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, YAN Mingjiang, et al. Impact of irrigating farmland increase production with water save on groundwater exploitation in the plain of Hutuo River basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 350-355. (in Chinese))

[9] 张光辉,费宇红,王惠军,等.河北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.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, WANG Huijun, et al. Impact of farmland production increasing under irrigation water saving on groundwater exploitation in Hebei plain [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(5): 645-650. (in Chinese))

[10] 张光辉,费宇红,刘春华,等.华北滹沱平原地下水位下降与灌溉农业关系[J].水科学进展,2013,24(2):228-234.(ZHANG Guanghui, FEI Yurong, LIU Chunhua, et al. Relationship between decline of shallow groundwater levels and irrigated agriculture on Hufu Plain of North China [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 228-234. (in Chinese))

(下转第 649 页)

- Ting lin, REN Lei. One dimension mathematical model for oil pollution transport in silt laden stream(II): Desorption model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(10): 125-128. (in Chinese)
- [62] 禹雪中, 杨志峰, 钟德钰, 等. 河流泥沙与污染物相互作用数学模型[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 10-15. (YU Xuezhong, YANG Zhifeng, ZHONG Deyu, et al. Numerical model for interaction between sediment and pollutant in river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 10-15. (in Chinese))
- [63] 何用, 李义天, 郜会彩, 等. 泥沙污染水质模型研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 12-17. (HE Yong, LI Yitian, GAO Huicai, et al. Research on sediment pollution water quality model[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Sciences, 2004, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [64] Kyungyun K. Modeling phosphorus transport in a river under unsteady flow conditions[D]. Champaign Urbana: University of Illinois at Urbain Champaign graduate College, 2005.
- [65] 李剑超. 河湖底泥有机污染物迁移转化规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2002. (LI Jianchao. Study on organic contaminant transport and transform in bottom sediment of water system [D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [66] Chen H, Kandasamy S, Orszag S, et al. Extended Boltzmann kinetic equation for turbulent flows [J]. Science, 2003, 301(5633): 633-636.
- [67] Nguyen N Q, Ladd A J C. Lubrication corrections for lattice Boltzmann simulations of particle suspensions [J]. Physical Review E, 2002, 66(4): 046708.
- [68] 吴锤结, 周菊光. 悬浮颗粒运动的格子 Boltzmann 数值模拟[J]. 力学学报, 2004, 36(2): 151-162. (WU Chuijie, ZHOU Jirguang. Numerical simulations of suspended motion of irregular shaped particles via the lattice Boltzmann method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(2): 151-162. (in Chinese))
- [69] 张金凤, 张庆河. 黏性泥沙不等速沉降絮凝的格子 Boltzmann 模拟[J]. 水利学报, 2009(4): 385-390. (ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe. Lattice Boltzmann simulation for flocculation of cohesive sediment due to differential settling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009(4): 385-390. (in Chinese))
- [70] 张金凤, 张庆河. 絮团与颗粒不等速沉降碰撞研究[J]. 泥沙研究, 2012(1): 32-36. (ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe. Study of particle cluster aggregation in differential settling[J]. Journal of Sediment Research, 2012(1): 32-36. (in Chinese))
- [11] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1-10. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 严明疆, 王金哲, 李德龙, 等. 年降水量变化条件下农灌引水与开采对地下水位影响[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 27-30. (YAN Mingjiang, WANG Jizhe, LI Delong, et al. Impact of diversion water and pumpage for agriculture influenced by precipitation on groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 27-30. (in Chinese))
- [13] 刘中培, 张光辉, 严明疆, 等. 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[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 111-115. (LIU Zhongpei, ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, et al. Impact of fertilization and high grain production on groundwater exploitation in Shijiazhuang Plain[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2012, 20(1): 111-115. (in Chinese))
- [14] TIMOTHY R. G, MAKOTO T, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405: 532-560.
- [15] WANG Lifu, YUE Lirui, TANG Zhenjun, et al. Influence of Climate Change and Agricultural Development on Groundwater level in Shiyang River Basin[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 121-128. (in Chinese)
- [16] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12. (LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese))
- [17] 李新波, 孙宏勇, 张喜英, 等. 太行山山前平原区蒸散量与作物灌溉需水量的分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 26-30. (LI Xinbo, SUN Hongyong, ZHANG Xiying, et al. Analysis of irrigation demands and evapotranspiration in piedmont of Taihang Mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 26-30. (in Chinese))

(上接第 625 页)