



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.018

田言亮, 张光辉, 严明疆, 等. 冀中山前平原农灌用水与地下水承载力适应性状况[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 111-116. TIAN Yan liang, ZHANG Guang hui, YAN Ming jiang, et al. A daptability between agricultural irrigation and groundwater carrying capacity in Central Hebei Piedmont Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 111-116. (in Chinese)

冀中山前平原农灌用水与地下水承载力适应性状况

田言亮, 张光辉, 严明疆, 王 茜, 王金哲

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 针对冀中太行山前平原浅层地下水严重超采与农林灌溉用水之间关系问题, 应用地学的模数理念、水量均衡理论方法和 MapGIS 空间特征分析技术, 建立了农灌用水与地下水承载力之间适应性状况评价方法及指标体系, 以 0.49 km² 剖分单元精度识别了冀中山前平原农林灌溉用水强度及其与浅层地下水可采资源量之间适应性状况。结果表明, 冀中山前平原农林灌溉导致的“极严重不适应”或“严重不适应”状态是浅层地下水超采的主要原因, 其中小麦等夏粮作物灌溉用水主导了这些农灌区地下水超采, 蔬菜作物和耗水型果林灌溉开采对地下水的影响呈显著增加趋势, 应重视这种非理性加剧影响因素。

关键词: 冀中山前平原; 灌溉用水; 地下水资源承载力; 浅层地下水超采; 适应性

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0111-06

Adaptability between agricultural irrigation and groundwater carrying capacity in Central Hebei Piedmont Plain

TIAN Yan liang, ZHANG Guang hui, YAN Ming jiang, WANG qian, WANG Jin zhe
(*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China*)

Abstract: Aiming at the problems of the water resources shortage and serious groundwater overexploitation for agricultural irrigation in the central Hebei piedmont plain, the evaluation index system and the evaluation method for the adaptability between agricultural irrigation and groundwater carrying capacity were established at an accuracy of 0.49 km² by applying the earth science module concept, equilibrium theory and MapGIS technology. Evaluation results showed that the agricultural irrigation water intensity was in "serious incommensurate" status in most areas of the Hebei Taihang Piedmont Plain and the agricultural irrigation water was in "very serious incommensurate" state in most groundwater overdraft areas of Hebei plain, in which the summer crops such as wheat crop had an irrigation water intensity dominates groundwater overdraft, and the ratio of the irrigation water strength of the vegetable crop and the consumption fruit trees in total agricultural irrigation water increases showed a significant percentage increase trend. We should avoid this kind of irrational continuous increase.

Key words: Central Hebei Piedmont Plain; agricultural irrigation; carrying capacity of groundwater resources; groundwater overexploitation; adaptability

收稿日期: 2015-12-15 修回日期: 2016-05-20 网络出版时间: 2016-08-18
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.2125.007.html>
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502253; 41172214)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41502253; 41172214)

作者简介: 田言亮(1985-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事区域地下水循环演化方面的研究。E-mail: yanliang209@163.com

通讯作者: 张光辉(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士生导师, 长期从事区域水循环演化和地下水可持续利用研究。E-mail: Huanjing@heinfo.net

冀中山前平原浅层地下水超采主因是农林灌溉。该平原区总用水量的 80% 以上来自于地下水,当地地下水总开采量的 85% 用于农业灌溉。其中,石家庄地区当地总开采量的 83.71%、邯郸为 86.73%、保定 84.59% 和衡水 90.20% 用于农业灌溉^[1]。因此,开展该区农灌用水与地下水承载力之间适应性研究,对于缓解该区地下水超采问题具有重要意义。

有关农业用水与区域水资源适应性的研究较多^[2-9]。程彦培、马峰、姜秋香等研究表明农业灌溉是影响水资源承载力的重要因素。郑昌晶、张光辉、刘中陪等研究表明,我国北方平原区农业灌溉对地下水超采影响显著^[10-21]。范建勇等认为,农业灌溉导致了华北严重的地下水超采^[18-23]。张光辉等提出了地下水可持续利用性评价理论方法,并在我国华北、西北和东北地区地下水功能评价中得到广泛应用^[24-26]。有关农业灌溉用水与地下水承载力适应性评价是有待进一步研究课题^[1]。

本文资料来自于国家科技项目、地质调查项目调查所得和气象、国土、水利、农业等部门监测所得,采用本项目创建的适应性评价理论方法^[1],对冀中山前平原区小麦、玉米、蔬菜和耗水型果林的不同播种及灌溉开采地下水时空特点,分区、分类进行了适应性状况量化评价。

1 研究区概况

冀中山前平原区位于河北省太行山前平原,包括邯郸市的临漳、成安、磁县、肥乡、永年县和山前部分县平原部分,邢台市的柏乡、隆尧、任县、南和、宁晋县和山前部分县平原部分,石家庄市的正定县、栾城区、行唐县、高邑县、深泽县、无极县、元氏县、赵县、辛集市、藁城区、晋州市、新乐市、鹿泉区,以及保定市的清苑、徐水、定兴、望都、涿州、定州市、安国、高碑店县和山前部分县平原部分,面积 3.17 万 km² (图 1)。该区是我国小麦主产区,也是华北平原浅层地下水超采最为严重地区。

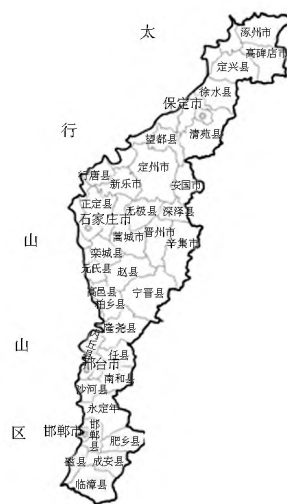


图 1 冀中山前平原区各县分布

Fig. 1 Distribution of each county in the central Hebei piedmont plain

2 基本概念与评价方法

2.1 基本概念与资料来源

2.1.1 基本概念

地下水承载力是地下水资源承载力的简称,它是指一定时间尺度的均衡期内(一般不小于 10 年)多年平均地下水可开采资源的数量。灌溉用水强度是指平均每年、每平方千米内灌溉用水的数量(万 m³/(a·km²))。

有关“水资源承载力”的概念主要包括三种:(1)水资源支撑社会经济系统持续发展能力论;(2)水资源承载最大人口论;(3)水资源开发规模论。它们的不同点是所强调的服务对象不同。本文中的“水资源承载力”指的是在自然环境中可更新的、客观存在的、不会引起自然生态系统恶化的前提下能被人类社会利用的水资源数量^[27-29]。

本文中“适应性”是指一定区域单位面积的地下水可开采资源量与相应农业(或不同作物)灌溉用水强度之间均衡状况,采用 I 指标表达,评价等级、依据和意义见表 1。

表 1 农业区当地水资源承载力与用水强度之间适应性评价分级及标准体系

Tab. 1 The index system of evaluation situation between the groundwater carrying capacity and the irrigation intensity

评价指数(I)和分级标准(%)	> 20	20~ - 20	- 20~ - 50	- 50~ - 80	- 80~ - 110	≤ - 110
评价分级	有潜力	均衡	一般不适应	较严重不适应	严重不适应	极严重不适应
评价代码	$I_{潜}$	$I_{均}$	$I_{般}$	$I_{较}$	$I_{重}$	$I_{极}$
编图代码	1	2	3	4	5	6
图例图标	深绿色	蓝绿色	浅绿色	浅黄色	橘黄色	红色

备注:评价指数(I)=(可用的水资源量-实际用水量)×100/可用的水资源量(%)。

表 1 中,“有潜力”是指某研究区可用于农业的

地下水可采资源量大于当地农林灌溉用水量,尚有

至少 20% 的潜力。“均衡”是指某研究区地下水可采资源量与当地农林灌溉用水量之间水量差介于 ±20%，用水比率处于良性。“一般不适应”表示某研究区地下水可采资源量小于当地农业灌溉用水量，但农林灌溉超用水量小于 50%。“较严重不适应”是指某研究区地下水可采资源量小于当地农林灌溉用水量，且农林灌溉超用水量大于 50%、小于 80%。“严重不适应”是指某研究区地下水可采资源量小于当地农林灌溉用水量，且农林灌溉超用水量大于 80%、小于 110%。“极严重不适应”是指某研究区地下水可采资源量小于农林灌溉用水量，且农林灌溉超用水量大于 110%。

2.1.2 资料来源

气象资料选择研究区内具有较完整资料序列(1961年–2010年)的逐日降水、气温和蒸发气象站点监测资料。

地下水方面资料主要是国土部门监测和评价资料；地表水资源量和实际供用水量以海河水利委员会和河北省各地市水利部门监测与调查资料为主；供水量主要包括浅(深)层地下水和地表水。

用水量包括农田灌溉、工业、城市公共与生活、林牧渔畜、农村居民生活和生态环境用水量。

灌溉农业资料主要来自研究区各地市、县农村经济统计年鉴，数据以乡为统计单，资料主要包括小麦、玉米、稻谷等粮食作物、各类蔬菜和(苹果、梨、桃、葡萄等)鲜果林播种面积和产量，灌溉定额、实际灌溉水量、灌溉时间及次数，耕地、水田和水浇地面积。

2.2 评价方法

农林灌溉用水与地下水承载力之间适应性状况的评价指标，采用“评价指数”(I)表达，见式(1)。

$$I(N_m, W_m, G_m) = (G_m - W_m) * 100 / (G_m F_m) \quad (1)$$

$$W_m(N) = \sum_{i=1}^n W_i^{\text{麦}} + W_i^{\text{玉}} + W_i^{\text{蔬}} + W_i^{\text{果}} \quad (i = 1, 2,$$

3, ..., n, 为剖分单元序号)

式中： N_m 为第 m 分区灌溉作物种类(小麦、玉米、蔬菜和耗水型果林)的数量； $W_m(N)$ 为第 m 分区、 N 种农作物的灌溉用水量(万 m^3/a)； G_m 为当地地下水开采资源量； F_m 为研究区面积(km^2)； I 为第 m 分区单位面积灌溉用水强度的适应性结果。当 $I < 0$ 时，表示该分区水资源承载力小于农业用水量；当 $I > 0$ 时，表示该分区水资源承载力大于农业用水量，尚有水资源可用于农业灌溉。根据 I 具体计算结果，可以判别某区域农业灌溉与水资源承载力之

间的适应性状况。

保障工业和生活用水(二者用水量之和 \geq 总用水量 30%)，同时考虑粮蔬生产安全和区域地下水资源可持续利用，所以，本文采用多年平均地下水可采资源量(1991年–2010年)的 70% 作为基准值用于模型的识别与评价。此后，利用 MapGIS 空间分析技术，构建 $0.7 \times 0.7 \text{ km}^2$ 精度剖分评价体系，即以面积为 0.49 km^2 剖分基本单元，建立各县分区不同作物灌溉用水强度数据库，核查各县分区地表水和地下水资源可利用量。最后在剖分单元体系上，建立地下水可采资源量与农业灌溉用水强度的适应性状况评价体系。由此，利用式(1)计算各单元的 I 值并确定适应性状态。

根据上述结果，绘制 I 值等值线图，依据表 1 的评价分区标准，可以得到研究区农业灌溉用水强度“适应性”状态图。分析各状态区的属性、成因与趋势；最后，提出针对各分区的建议与对策。

3 研究结果

3.1 农灌用水与地下水承载力分布特征

从农林灌溉用水强度来看，冀中山前平原农业区明显大于华北平原(11.07 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$)。冀中山前平原农业区农林用水强度绝大部分在 18 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上(图 2a)，其中，辛集-藁城-无极-正定-栾城-元氏一带达 33.84 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ ，部分农区在 36 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上，超出当地农业可利用水资源量的 2 倍。

以地下水可采资源量的 70% 作为基准值，冀中山前平原的西北部浅层地下水开采资源模数大于 10 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ ，其中定兴、容城和易县-曲阳地区地下水开采资源模数也较大，介于 19.27~20.11 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。衡水-廊坊一带，地下水开采资源模数较小，在 2.49~5.77 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 之间。除了以上地区，其余大部分地区在 7.0~10 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 之间。

自 20 世纪 80 年代以来，研究区绝大部分河流常年断流，区内可用于农业灌溉的地表水资源十分有限。

3.2 农灌用水与地下水承载力之间适应性状况

3.2.1 适应性状况分布特征

从图 2b 可见，冀中山前平原的大部分地区农灌用水强度与地下水可采资源承载力之间处于“极严重不适应”或“严重不适应”状态，只有在该平原区

的西北部保定地区, 农林灌溉用水处于“有潜力”或“均衡”状态(表 2)。

表 2 河北太行山前平原地下水可采资源量与灌溉用水强度之间适应性状况

Tab. 2 Situation between the groundwater carrying capacity and the irrigation intensity in Hebei plain

研究区	地下水可采资源量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$)	分析评价结果	
		评价指数(%)	适应性状况
石家庄	12.74	- 165.63	<i>I</i> 极
廊坊	5.77	- 101.92	<i>I</i> 重
保定	17.79	- 26.57	<i>I</i> 般
北京	23.07	+ 13.76	<i>I</i> 均
衡水	4.99	- 195.79	<i>I</i> 极
邢台	8.09	- 106.31	<i>I</i> 重
邯郸	9.50	- 81.24	<i>I</i> 重
安阳	9.18	- 156.14	<i>I</i> 极

“极严重不适应”或“严重不适应”状态的地区, 主要分布在石家庄和衡水地区, *I* 值分别为 - 165.63% 和 - 195.79%。其次是邢台、邯郸一带, 大部分为“严重不适应”或“较严重不适应”状态, 少部分为“极严重不适应”, *I* 值分别为 - 106.31% 和 - 81.24%。

3.2.2 地下水超采区适应性状况

(1) 石家庄-宁隆柏-邢台地下水超采区。

该超采区是华北平原最大的浅层地下水超采区, 面积 10 000 km^2 以上, 漏斗中心区的地下水位埋深已达 65 m, 而 1975 年水位埋深仅 11.78 m。该区农林灌溉用水状况为“极严重不适应”(图 2b), 农林灌溉用水强度与地下水资源承载力之间的 *I* 值超过 - 110%。大部分地区农林灌溉用水强度在 23 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上, 远大于当地地下水可开采资源量(7.0~ 12.9 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$)。

在“极严重不适应”状态区域中, 小麦等夏粮作物灌溉用水强度占农林灌溉用水强度的 52.32%~ 62.97%, 其值大部分在 17 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上。玉米等秋粮作物灌溉用水强度占农林灌溉用水强度的 17.99%~ 31.32%, 其值大部分在 7 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上。蔬菜作物和耗水型果林灌溉用水强度, 分别占该超采区农林灌溉用水强度的 4.06%~ 16.93% 和 6.76%~ 8.23%, 其中该区南部的蔬菜作物和耗水型果林灌溉用水强度所占权重, 明显比该区北部小。该超采区南部的小麦等夏粮作物和玉米等秋粮作物的灌溉用水强度所占权重, 都大于该区北部。

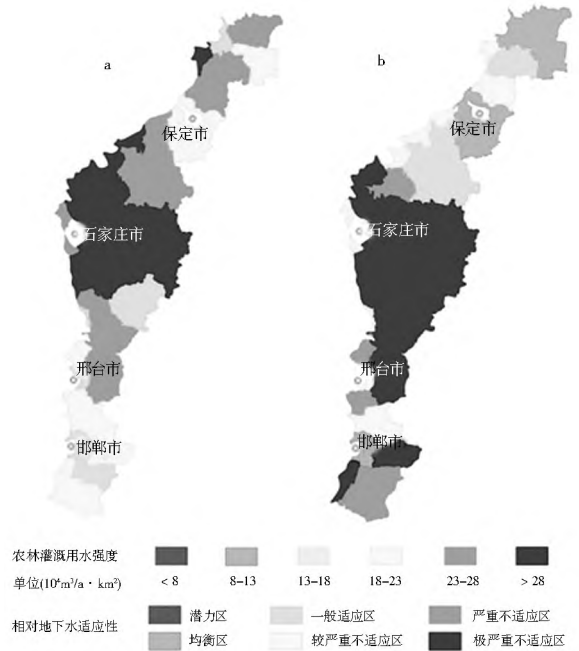


图 2 河北太行山前平原灌溉用水强度(a)及其与地下水承载力之间适应性状况(b)分布图

Fig. 2 Distribution of the irrigation intensity and the Situation between the irrigation intensity and the groundwater carrying capacity in Hebei Taihang Piedmont plain

(2) 保定-高蠡清超采区。

保定-高蠡清(高阳-蠡县-清苑)超采区位于“宁隆柏”漏斗区以北, 区内浅层地下水降落漏斗面积 2 217 km^2 , 漏斗中心区地下水位埋深已超过 60 m, 而 1975 年水位埋深仅 12.11 m。在保定-高蠡清超采区, 小麦等夏粮作物灌溉用水强度占该区农林灌溉用水强度的 61.51%, 达 12 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上。玉米等秋粮作物灌溉用水强度占该区农林灌溉用水强度的 18.66%, 达 3.2 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上。蔬菜作物或耗水型果林灌溉用水强度, 分别占该超采区农林灌溉用水强度的 12.18% 和 2.77%。

(3) 邯郸超采区。

邯郸超采区是位于“宁隆柏”漏斗区以南, 漏斗区面积 2 211 km^2 , 漏斗中心区地下水位埋深已超过 53 m。在邯郸超采区, 农林灌溉用水强度少部分为“极严重不适应”状态, 大部分处于“严重不适应”和“较严重不适应”状态, 其值在 13 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上, 此外该超采区的南部其值更在 23 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 以上, 远超当地地下水可开采量(7.0~ 10.1 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$)。

在“严重不适应”状态区, 农林灌溉用水强度的 43.74%~ 51.43% 用于夏粮作物(小麦等)灌溉, 夏粮作物灌溉用水强度大部分地区超过 12 万 $\text{m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。玉米等秋粮作物灌溉用水强度占农林灌溉用水强度的 11.74%~ 22.68%, 大部分地区超

过 $8 \text{万 m}^3 / (\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。蔬菜作物和耗水型果林灌溉用水强度,分别占该超采区农林灌溉用水强度的 $20.23\% \sim 37.08\%$ 和 $4.26\% \sim 7.44\%$ 。

4 结论

基于水文地学的“模数”理念、单元剖分方法和 70% 的地下水开采资源量(生活和工业用水占 30%),应用本项目组创建的农林灌溉用水强度与地下水资源承载力之间适应性状况评价理论方法,研究结果如下。

(1) 灌溉农业,尤其以小麦为主的夏粮作物和蔬菜灌溉开采,已经成为冀中山前平原农业区浅层地下水超采的主要因素。

(2) 在冀中山前平原农林灌溉用水处于“极严重不适应”或“严重不适应”状态的地区,不是仅因为当地地表水匮乏,而是灌溉农业用水规模远超过了当地水资源承载力,尤其是小麦作物和蔬菜等高耗水作物的种植规模。

(3) 在冀中山前各超采区中,小麦等夏粮作物灌溉用水强度占 50% 以上,有些地区高达 62.97% 。同时,蔬菜等开采地下水量呈显著增加趋势,很多地区蔬菜灌溉用水强度在 20% 以上,为避免蔬菜灌溉开采地下水的非理性持续大幅增加,应引起人们高度重视。

参考文献(References):

[1] 张光辉, 费宇红, 王金哲, 等. 华北灌溉农业与地下水适应性 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, WANG Jirzhe. Adaptability between irrigated agriculture and groundwater in North China [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))

[2] 胡克林, 肖新华, 李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 665-670. (HU Kelin, XIAO Xinhua, LI Baoguo. Numerical analysis of the effect of the different lower boundary conditions on water drainage in irrigated field [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 665-670. (in Chinese))

[3] 路振广, 路金镶, 袁宾. 大田作物非充分灌溉实施效果分析评价[J]. 灌溉排水学报, 2007(5): 30-33. (LU Zhen guang, LU Jin xiang, YUAN Bin. Analysis and evaluation of results of implementing deficit irrigation for field crop [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007(5): 30-33. (in Chinese))

[4] 徐英, 陈亚新, 王俊生, 等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克立格分析评价[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 543-548. (XU Ying, CHEN Yaxin, WANG Junsheng, et al. Using indicator Kriging to analyze and evaluate spatial distributions of soil water and salt in field [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 543-548. (in Chinese))

[5] 姚治君, 林耀明, 高迎春, 等. 河北太行山前平原分区适宜性农业节水技术与潜力[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 259-264. (YAO Zhijun, LIN Yaoming, GAO Yingchun, et al. The water saving technologies and potentials for regional suitable agriculture in North China Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 259-264. (in Chinese))

[6] 屈忠义, 陈亚新, 史海滨, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉工程实施后地下水变化的 BP 模型预测[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 59-62. (QU Zhongyi, CHEN Yaxin, SHI Haibin, et al. Regional groundwater depth forecast by BP model of post-water saving reconstruction in the Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 59-62. (in Chinese))

[7] 周维博, 曾发琛. 井渠结合灌区地下水动态预报及适宜渠井用水比分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 6-9. (ZHOU Weibo, ZENG Fachen. Groundwater level forecast and the appropriate channel and well water analysis of irrigation area combined with well and canal [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 6-9. (in Chinese))

[8] 王贵玲, 蔺文静, 陈浩. 农业节水缓解地下水水位下降效应的模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 286-290. (WANG Guiling, LIN Wenjing, CHEN Hao. The simulation of agricultural water saving mitigation in groundwater level lowering effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 286-290. (in Chinese with English abstract))

[9] 徐旭, 黄冠华, 屈忠义, 等. 区域尺度农田水盐动态模拟模型 GSWAP [J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 58-63. (XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Regional scale model for simulating soil water flow and solute transport processes GSWAP [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 58-63. (in Chinese))

[10] 程彦培, 宋乐. 基于土地利用的水资源承载力评价方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 41-44. (CHENG Yanpei, SONG Le. Evaluation method of water resource carrying capacity based on land use [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 41-44. (in Chinese))

[11] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, WANG Guiling. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model—a case study in Shijiazhuang [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese))

[12] 姜秋香, 付强, 王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异[J]. 农业工程学报, 2011, (9): 184-190. (JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity in Sanjiang plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, (9): 184-190. (in Chinese))

[13] 刘东, 封志明, 杨艳昭, 等. 中国粮食生产发展特征及土地资源承载力空间格局现状[J]. 农业工程学报, 2011(7): 1-6, 398.

- (LIU Dong, FENG Zhiming, YANG Yanzhao, et al. Characteristics of grain production and spatial pattern of land carrying capacity of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011(7): 1-6, 398. (in Chinese))
- [14] 阮本清, 韩宇平, 蒋任飞, 等. 生态脆弱地区适宜节水强度研究[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 809-814. (RUAN Benqing, HAN Yuping, JIANG Renfei, et al. The suitable water-saving strength for ecologically fragile areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 809-814. (in Chinese))
- [15] 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, 19(5): 56-59. (YANG Luhu, SHEN Rongkai, CAO Xiuling. Scheme of groundwater use in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 56-59. (in Chinese))
- [16] 贺屹, 祝田多娃. 基于随机-确定模型的渠井结合灌区用水优化配置[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 421-426. (HE Yi, Zhutian Dowa. The water use optimization allocation of the irrigation district combined with the channel and well based on the random determined model[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 421-426. (in Chinese))
- [17] 岳卫峰, 杨金忠, 占车生. 引黄灌区水资源联合利用耦合模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 35-40. (YUE Weifeng, YANG Jizhong, ZHAN Chesheng. Coupled model for conjunctive use of water resources in the Yellow River irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 35-40. (in Chinese))
- [18] 刘路广, 崔远来, 冯跃华. 基于 SWAP 和 MODFLOW 模型的引黄灌区用水管理策略[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 9-17. (LIU Luguang, CUI Yuanlai, FENG Yuehua. Water management strategies of Yellow River Irrigation District based on SWAP and MODFLOW models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 9-17. (in Chinese))
- [19] 郑昌晶, 蔺文静, 吴庆华, 等. 冀东平原农业节水技术及地下水响应[J]. 南水北调与水利科技, 2010, (6): 125-128. (ZHENG Changjing, LIN Wenjing, WU Qinghua, et al. Groundwater response to water saving agriculture in east Hebei Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, (6): 125-128 (in Chinese with English abstract))
- [20] 张光辉, 田言亮, 王电龙, 等. 冀中山前农业区地下水位强弱升降特征与机制[J]. 水科学进展, 2015, 26(2): 227-232. (ZHANG Guanghui, TIAN Yanliang, WANG Dianlong, et al. Sharp decline and sluggish rise of shallow groundwater level in the Central Hebei piedmont agricultural region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 26(2): 227-232 (in Chinese))
- [21] 刘中培, 于福荣, 焦建伟. 农业种植规模与降水量变化对农用地下水开采量影响识别[J]. 地球科学进展, 2012(2): 240-245. (LIU Zhongpei, YU Furong, JIAO Jianwei. Impact identification of planting scale and precipitation variation on agricultural groundwater exploitation[J]. Advances in Earth Science, 2012(2): 240-245 (in Chinese))
- [22] 范建勇. 农业灌溉是华北地下水超采主因[N]. 地质勘查导报, 2010-12-28(002). (FAN Jianyong. The main causes of the groundwater overexploitation for agricultural irrigation in North China[N]. Geological Exploration Herald, 2010-12-28(002). (in Chinese))
- [23] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 河北太行山前平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 48-249. (ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 48-249. (in Chinese))
- [24] 张光辉, 费宇红, 刘克岩. 河北太行山前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 Yuhong, LIU Keyan, WANG Jizhe. Regional groundwater exploitation for agriculture responding to precipitation in North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 43-48. (in Chinese))
- [25] 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 Yuhong, YAN Mingjiang, et al. Effect of irrigated farmland water-saving yield increase on groundwater exploitation[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 350-355. (in Chinese))
- [26] 张光辉, 聂振龙, 申建梅, 等. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, SHEN Jianmai, et al. Theory and methodology of regional groundwater function and sustainable utilization assessment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [27] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. 水利学报, 2004(1): 38-45. (LONG Tengrui, JIANG Wenchao, HE Qiang. Water resources carrying capacity new perspectives based on eco-economic analysis and sustainable development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 38-45. (in Chinese))
- [28] 冯耀龙, 韩文秀, 王宏江, 等. 区域水资源承载力研究[J]. 水科学进展, 2003(1): 109-113. (FENG Yaolong, HAN Wenxiu, WANG Hongjiang, et al. Study on the region water resources carrying capacity[J]. Advances In Water Science, 2003(1): 109-113. (in Chinese))
- [29] 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 等. 论河北太行山前平原第四系地下水系统之演化[J]. 中国科学 D 辑, 1997, 27(2): 168-173. (ZHANG Zonghu, SHI Dehong, REN Fuhong, et al. Evolution of quaternary groundwater system in north China plain[J]. Science in China: Series D, 1997, 27(2): 168-173. (in Chinese))