

河北平原农田净灌溉耗水研究

袁再健^{1,2}, 谢焱乐¹, 张秉文³, 沈彦俊², 周淑梅¹

(1. 河北科技大学 经济管理学院, 石家庄 050018; 2. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021;
3. 河北省承德水文水资源勘测局, 河北 承德 067000)

摘要: 农田灌溉是华北平原地下水资源消耗的主要途径, 灌溉耗水研究对探讨区域灌溉效率、灌溉水平与规模具有重要参考价值。以河北平原为例, 基于1981年-2010年河北省经济统计数据、常规气象数据及地下水位等数据, 初步分析了河北平原近30年来农田净灌溉耗水及其与降水、气温、粮食产量、地下水位的关系。结果表明, 近30年来, 河北平原生产粮食约6亿t, 净消耗的灌溉水约 $149.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 农田净灌溉耗水引起地下水位下降约18m; 河北平原农田净灌溉耗水与气温、地下水开采量、地下水埋深、粮食产量均呈较显著正相关关系, 但与年降水量无明显相关性。为了合理利用华北平原地下水资源、减缓地下水位下降速度, 进一步发展节水农业是促进该地区农业可持续发展的必由之路。

关键词: 河北平原; 净灌溉耗水; 年降水; 年均温; 粮食产量; 地下水位

中图分类号: P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0780-05

Agricultural irrigation water net consumption in the Hebei Plain

YUAN Zaï jian^{1,2}, XIE Lir yue¹, ZHANG Bing-wen³, SHEN Yar jun², ZHOU Shu mei¹

(1. School of Economics & Management, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China;
2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 3. Chengde Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hebei Province, Chengde 067000, China)

Abstract: Agricultural irrigation is the main source of the groundwater resources consumption in the North China Plain (NCP). Research on the irrigation water consumption can provide important reference to the regional irrigation efficiency and scale. In this paper, based on the economic statistical data, conventional meteorological data, and groundwater level data in Hebei province from 1981 to 2010, the agricultural irrigation water net consumption and its relationships with precipitation, temperature, grain yield, and groundwater level were investigated. The results showed that 0.6 billion tons of grain have been produced in the Hebei Plain in the past 30 years, while the irrigation water net consumption is about $149.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, which causes a decline of about 18 m in groundwater level. Moreover, agricultural irrigation water net consumption has positive correlations with temperature, groundwater exploitation amount, groundwater depth, and grain yield, but has insignificant correlation with precipitation. In order to utilize groundwater resources reasonably in NCP and reduce the decline rate of groundwater level, further development of water saving agriculture is necessary to promote the sustainable development of agriculture in the region.

Key words: Hebei Plain; irrigation water net consumption; annual precipitation; average annual temperature; grain yield; groundwater level

灌溉耗水是指灌溉行为所引起的水资源消耗量, 农田灌溉水除大部分消耗于蒸散发外, 其余部分成为地表径流以及因深层渗漏成为可被重复利用的地下水, 本文所研究的净灌溉耗水仅指消耗于蒸散发的这部分灌溉水。由于农田灌溉

产生的地表径流与深层渗漏量难以精确测量, 目前国内外的研究集中在农田灌溉需水(包括净灌溉需水)方面^[1-6], 农田灌溉耗水的研究较少^[7-9]。灌溉耗水与灌溉需水的差别在于, 前者表征的是实际消耗的灌溉水, 而后者是指供农田作

收稿日期: 2014-10-14 修回日期: 2015-04-16 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2023.021.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471027; 40901130); 河北省自然科学基金项目(10457205); 河北省高等学校青年拔尖人才项目(BJ2014078)。

作者简介: 袁再健(1976-), 男, 湖南武冈人, 教授, 博士, 主要从事生态水文、水土保持以及GIS应用研究。E-mail: selfsurpass@163.com

通讯作者: 沈彦俊(1971-), 男, 河北张家口人, 研究员, 博士, 主要从事生态水文、环境遥感与应用等方面的研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

物正常发育所需要的灌溉水量,通常情况下,灌溉耗水小于灌溉需水,灌溉耗水有助于弄清农业生产中的灌溉效率与水平,对农业合理灌溉有重要指导意义。

华北平原是我国粮食主产区,对保障国家粮食安全具有举足轻重的作用,但水资源的匮乏已成为威胁该区域农业生产的最大障碍^[9]。特别是近年来,随着工农业的发展,水资源需求快速增长,加上日益严峻的地表水和地下水污染,使得该区域水资源短缺的状况愈发严重^[11]。该平原地下水开采占总用水量的 69.81%,其中农业开采量占地下水总开采量的 78.82%,严重超采导致地下水位持续下降进而引起华北平原大面积沉降^[12]。近年来,一些学者在该区域开展了农田蒸散与灌溉用水方面的相关研究,如:莫兴国等^[13]模拟分析了华北平原冬小麦和夏玉米生育期蒸散过程与时空分异特征;Zhang 等^[14]研究了华北平原灌溉条件下冬小麦和玉米的蒸散量变化;胡玉昆等^[15]分析了灌溉量对华北平原冬小麦产量、蒸散量、水分利用效率的影响;张光辉等^[12]探讨了华北平原灌溉用水强度及地下水承载力适应性;马林等^[16]运用水分平衡原理分析了华北平原灌溉需水量时空分布特征及其驱动因素。为了进一步了解华北平原的灌溉效率,有必要深入探讨农田灌溉耗水及其影响因素,因此,本文选择华北平原浅层地下水超采的典型区域—河北平原作为研究区,探讨河北平原近 30 a 来农田灌溉耗水的时空变化及其与气象因子(主要是降水、气温)、地下水位、粮食产量之间的关系,为提高华北平原农业用水效率,实现华北平原农业水资源科学管理与合理配置提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本文所指河北平原系京津以南的河北平原(见图 1(a)),东经 114°20′–119°25′、北纬 36°03′–39°56′,北靠燕山,西依太行山,东临渤海,环绕京津,南与山东省和河南省接壤,包括石家庄、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水 7 个地级市的大部分县域,面积 61 852 km²,占全省总面积的 32.19%。属半干旱半湿润气候区,冬季干燥寒冷,夏季高温多雨,春季干旱少雨,蒸发强烈。年均温和年均降水量由南向北随纬度增加而递减。该地区人均水资源量仅为 335 m³/a,不足全国的 1/6,是中国的严重缺水地区之一,且地下水是该地区农业用水主要来源。考虑到研究区土壤孔隙度空间差异较大,本研究把河北平原分为太行山前平原区、河北中部平原区与滨海平原区三部分(见图 1(b)),其土壤有效孔隙度分别约为 0.20、0.12 与 0.06^[17]。

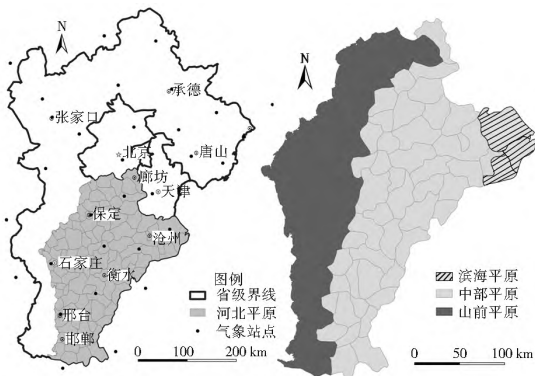


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

本研究气象数据来源于河北平原及周边常规气象站(见图 1),数据由中国气象局气象中心提供,且通过初步质量控制;耕地面积、粮食产量、有效灌溉面积等数据来源于河北省经济统计年鉴;地下水位、地下水开采量等数据来源于中国地质环境信息网中国地下水信息中心及他人文献资料^[18–21];所有数据时间长度为 30 a(1981 年–2010 年)。

1.3 研究方法

采用 Yuan and Shen(2013) 基于粮食产量、气象数据及有效灌溉面积估算河北省各县净灌溉耗水的方法^[9],公式如下:

$$D_g = (Irr_n \times 1000/LA)/P_e \quad (1)$$

$$Irr_n = Irr_n \times ELA/1000000 \quad (2)$$

$$Irr_n = ET_a - P_a \quad (3)$$

$$ET_a = GY_c \times K_f \times ET_{0a} \quad (4)$$

$$GY_{ci} = \frac{GY_i}{\overline{GY}} = \frac{GY_i}{\sum_{i=1}^n GY_i/30} \quad n=30 \quad (5)$$

$$K_f = 0.0003P_a + 0.2754Irr_{nre} + 0.0818 \quad (6)$$

$$Irr_{nre} = EIA/A \quad (7)$$

式中: D_g 为地下水位下沉深度(m); Irr_n 为地下水灌溉净消耗量(10⁹m³); Irr_n 为农田净灌溉耗水(mm); LA 为国土面积(km²); P_e 为有效孔隙度; ET_a 为农田年实际蒸散量(mm/a); P_a 为年降雨量(mm); EIA 为有效灌溉面积(km²); ET_{0a} 为年潜在蒸散量(mm); GY_{ci} 为第 i 年的粮食产量系数; GY_i 为第 i 年粮食单产(t/hm); \overline{GY} 为粮食多年平均单产(t/hm²); K_f 为土壤系数; Irr_{nre} 为灌溉率; A 为耕地面积。

潜在蒸散量 ET_0 (mm/d) 由彭曼-孟蒂斯公式计算^[122]如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

式中: R_n 为参考作物表面净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量密度(MJ/(m²·d)); γ 为干湿表常数(kPa/°C); T 为日均温(°C); u_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 表示饱和水汽压温度曲线的斜率(kPa/°C)。

2 结果与分析

2.1 河北平原农田净灌溉耗水估算

首先运用公式(8)计算得到 1981 年–2010 年各气象站点逐日潜在蒸散量 ET_0 。插值得到河北平原各县逐日 ET_0 ;然后采用公式(4)–式(7)计算得到河北平原各县逐年农田实际蒸散 ET ,最后利用公式(1)–式(3)计算出农田净灌溉耗水量及地下水位下降深度。计算结果表明,近 30 a 来,河北平原农田净灌溉耗水总量(由各县逐年净灌溉耗水量求和得到)达 149.4×10⁹m³,且总体呈显著增加趋势(见图 2),尤其是 20 世纪 90 年代明显增加,21 世纪以来,由于河北平原地下水开采强度有所缓解,农田净灌溉耗水也逐渐降低。从空间上来看,河北中部平原区灌溉耗水较太行山前平原区、滨海平原区多(见图 3(a)),并且除个别县(市)外,绝大部分县域近年来的净灌溉耗水都在增加(见图 3(b))。

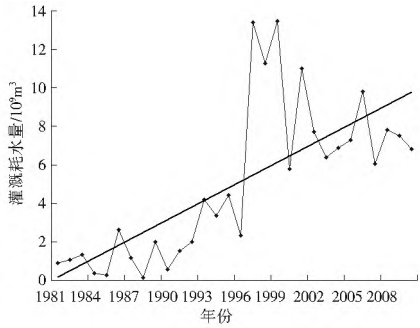


图 2 河北平原农田净灌溉耗水量年际变化
Fig. 2 Annual variation of agricultural irrigation water net consumption in the Hebei Plain

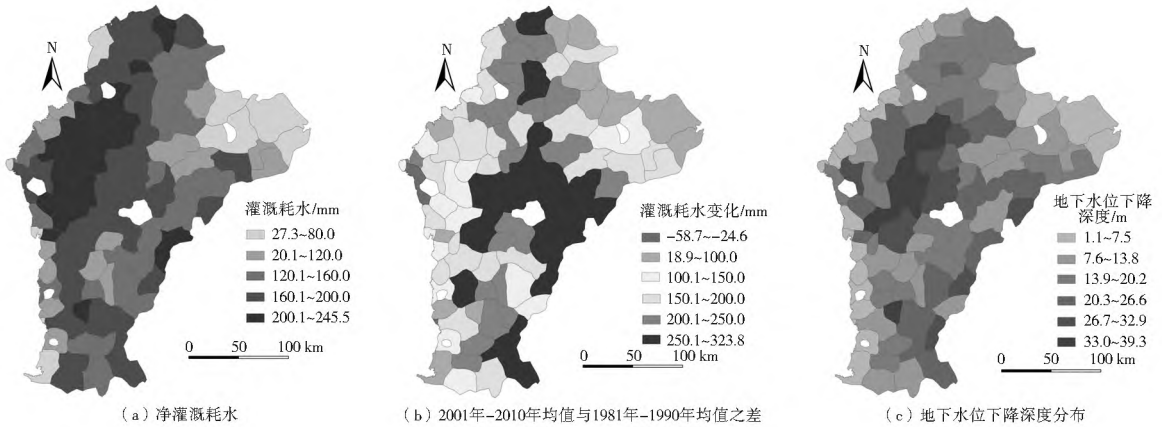


图 3 1981 年 - 2010 年河北平原各县年均农田净灌溉耗水变化及其引起的地下水下降深度分布

Fig. 3 Annual Trr_n (a), variation of averaged Trr_n (difference of Irr_n between the period of 1981~ 1990 and 2001~ 2010), and decline distribution of groundwater level caused by Irr_n of each county in the Hebei Plain

农田蒸散及农户灌溉行为, 气温越高, 蒸散越强烈, 作物所需水分越多, 进而消耗更多的灌溉水, 因此河北平原灌溉耗水与气温有显著正相关关系。

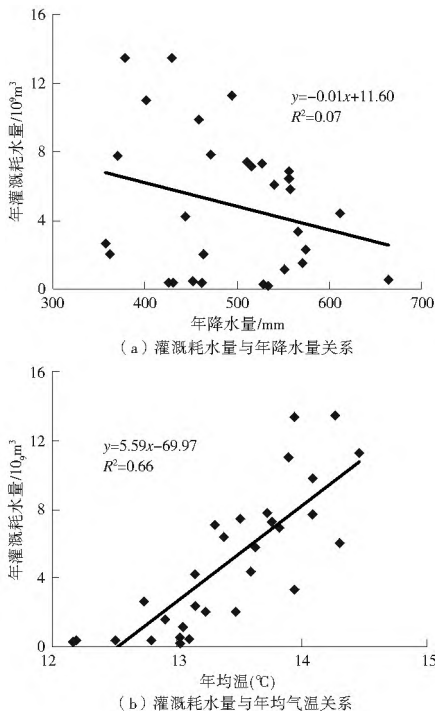


图 4 河北平原灌溉耗水量与年降水量(a)、年均气温(b)关系
Fig. 4 Relationships between Irr_n and annual precipitation(a), Irr_n and average annual temperature(b) in the Hebei Plain

河北平原地下水位下降主要是由农田地下水灌溉引起, 计算表明, 近 30 a 来, 河北平原因农田灌溉导致地下水位平均下降约 18 m, 但各县差异较大(见图 3(c)), 其中中部平原区下降最多, 空间分布与净灌溉耗水(图 3(a))基本对应。

2.2 净灌溉耗水与降水量、气温的关系

分析表明, 河北平原年灌溉耗水量与年降水量无明显相关(图 4(a)), 但与年均温呈显著正相关(见图 4(b)), 其线性相关系数 R 为 0.81。通常情况下, 降水越多, 农田灌溉耗水越少, 但由于河北平原降水时空分布不均, 耗水大户冬小麦生长季节雨热不同期, 所需灌溉量较大, 这是河北平原净灌溉耗水与天然降水无明显相关的原因; 而气温高低显著影响

2.3 净灌溉耗水与地下水开采量、地下水平均埋深的关系

地下水资源与灌溉耗水直接相关, 因为河北平原农田主要利用地下水灌溉, 进一步分析表明, 河北灌溉耗水与地下水开采量、地下水平均埋深均呈显著线性正相关关系(见图 5), 其线性相关系数 R 分别为 0.86 与 0.79, 灌溉耗水越大, 地下水开采量越多, 从而使得河北平原地下水位持续下降。

2.4 净灌溉耗水与粮食产量的关系

从 1981 年至 2010 年, 河北平原生产粮食共计 5.9×10^8 t, 粮食产量总体呈增加趋势(图 6(a)), 2010 年比 1981 年增加了 1.8×10^7 t, 增幅达 168.22%, 并且在 1998 年之前平稳增加, 1999 年 - 2010 年间粮食产量出现波动。近 30 a 来, 随着粮食的增产, 河北平原消耗的地下水明显增加, 灌溉是制约河北平原粮食生产的重要因素, 分析表明, 河北平原灌溉耗水量与粮食产量呈显著正相关关系(见图 6(b)), 其线性相关系数 R 达 0.83。

3 结论

本研究估算了河北平原农田的净灌溉耗水, 探讨了净灌溉耗水与降水气温、地下水、粮食生产的关系, 结果表明:

(1) 从 1981 年到 2010 年, 河北平原共生产粮食约 6 亿 t, 因粮食生产地下水资源净消耗 149.4 km^3 (平均每生产 1 t 粮食净消耗地下水 249 m^3), 农田净灌溉耗水引起地下水位下降约 18 m。

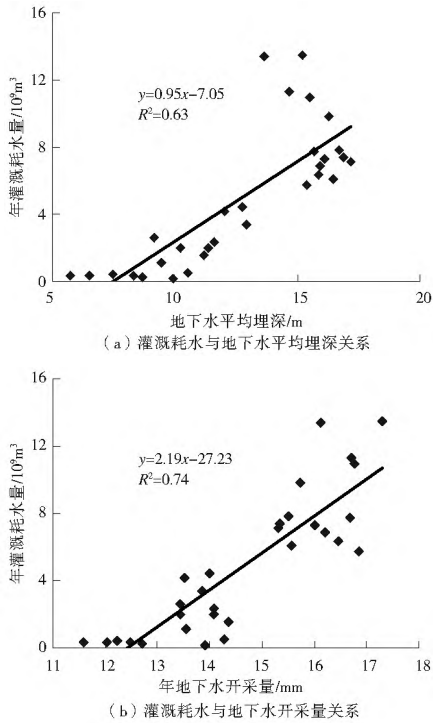


图5 河北平原灌溉耗水与地下水平均埋深(a)、地下水开采量(b)关系

Fig. 5 Relationships between Irr_{net} and groundwater exploitation (a), Irr_{net} and average groundwater depth(b) in the Hebei Plain

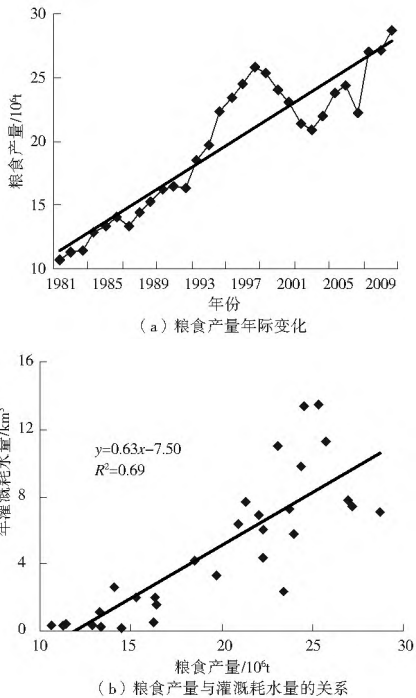


图6 河北平原粮食产量年际变化(a)及其与灌溉耗水量(b)关系

Fig. 6 Interannual variation of the grain yield(a) and its relationship with Irr_{net} (b) in the Hebei Plain

(2) 河北平原农田年净灌溉耗水量与年均温、地下水开采量、地下水平均埋深、粮食产量均存在较显著线性正相关关系,但与降水量无明显相关。

(3) 本研究以县域为基本空间单元,仅初步分析了河北

平原农田净灌溉耗水,计算过程中很多数据来源于二手资料,结果可能存在一定的偏差。下一步将结合土壤多点采样,从更微观尺度分析华北平原的农田灌溉耗水及其影响因素,结合南水北调工程实施情况,探讨南水北调对河北平原乃至整个华北平原农田灌溉耗水的影响机制,为该地区的地下水资源可持续利用提供依据。

参考文献(References):

- [1] 佟玲.西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境响应的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007. (TONG Ling. Impacts of environment change on agricultural water consumption in Shiyang river basin in arid region of northwest China[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007. (in Chinese))
- [2] Gunter W, Marijin V V, Alberto A, et al. Estimation irrigation water requirements in Europe[J]. J Hydrol, 2009, 373: 527-544.
- [3] 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 Guang hen, 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))
- [4] Yang Y M, Yang Y H, Moiwu J P, et al. Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China[J]. Agric. Water Manage., 2010, 97: 1711-1721.
- [5] Salazar M R, Hook J E, Garcia y Garcia, A, et al. Estimating irrigation water use for maize in the southeastern USA: A modeling approach[J]. Agri. Water Manage., 2012, 107: 104-111.
- [6] Wu Y P, Chen J Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: A case study of the Xir fengjiang reservoir in southern China[J]. Agri. Water Manage., 2013, 116: 110-121.
- [7] 邢大伟,张玉芳,粟晓玲.陕西省关中灌区灌溉耗水量与耗水结构[J].水利与建筑工程学报,2006,4(1):6-8,14. (XING Da wei, ZHANG Yufang, LI Xiaoling. Irrigation water consumption and water consumed structure in Guanzhong irrigation area of Shaanxi Province[J]. Journal of Water Resource and Architecture, 2006, 4(1): 6-8, 14. (in Chinese))
- [8] 朱发昇,董增川,冯耀龙,等.干旱区农业灌溉耗水计算方法[J].灌溉排水学报,2008,27(1):119-122. (ZHU Fasheng, DONG Zengchuan, FENG Yaolong, et al. Calculation of irrigation water consumption in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 119-122. (in Chinese))
- [9] Yuan Z J, Shen Y J. Estimation of Agricultural Water Consumption from Meteorological and Yield Data: A Case Study of Hebei, North China[J]. PLOS ONE, 2013, 8(3), e58685.
- [10] 刘昌明,何希吾.中国21世纪水问题方略[M].北京:科学出版社,1996. (LIU Changming, HE Xifu. Strategy for Chinese water problems in 21 century[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [11] 王金霞,李浩,夏军,等.气候变化条件下水资源短缺的状况及适应性措施[J].气候变化研究进展,2008,4(6):336-341. (WANG Jirxia, LI Hao, XIA Jun, et al. Water shortage and adaptation measure under climate change: simulation analysis in the Haihe river basin[J]. Advances in Climate Change Re

- search, 2008, 4(6): 336-341. (in Chinese)
- [12] 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 Yurong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese))
- [13] 莫兴国, 薛玲, 林忠辉. 华北平原 1981-2001 年作物蒸散量的时空分异特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 181-187. (MO Xingguo, XUE Ling, LIN Zhonghui. Spatiotemporal distribution of crop evapotranspiration from 1981-2001 over the North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 181-187. (in Chinese))
- [14] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades. Agri. Water Manage., 2011, 98: 1097-1104.
- [15] 胡玉昆, 杨永辉, 杨艳敏, 等. 华北平原灌溉量对冬小麦产量、蒸发蒸腾量、水分利用效率的影响[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(6): 701-705. (HU Yunkun, YANG Yonghui, YANG Yanmin, et al. Effect of irrigation on winter wheat yield, evapotranspiration and water use efficiency in North China Plain[J]. Wuhan University: Engineering Journal, 2009, 42(6): 701-705. (in Chinese))
- [16] 马林, 杨艳敏, 杨永辉, 等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 332-339. (MA Lin, YANG Yanmin, YANG Yonghui, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Journal of remote sensing, 2011, 15(2): 332-339. (in Chinese))
- [17] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999. (CHEN Wanghe. Hebei groundwater [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese))
- [18] 张光辉, 费宇红, 王慧军, 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. (ZHANG Guanghui, FEI Yurong, WANG Huijun, et al. Impact of farmland production increasing under irrigation water saving on groundwater exploitation in Hebei plain, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(5): 645-650. (in Chinese))
- [19] 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]. 中国地质大学学报, 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]. Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 879-884. (in Chinese))
- [20] 许月卿, 蔡运龙. 基于 GIS 的河北平原地下水位时空变化动态分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(2): 265-272. (XU Yueqing, CAI Yunlong. GIS-based analysis on spatiotemporal change of groundwater level in Hebei plain[J]. Journal of Peking University: Nature Sciences, 2005, 41(2): 265-272. (in Chinese))
- [21] 刘志国, 王恩德, 付建飞, 等. 河北平原地下水水位的时空变异[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(5): 717-720. (LIU Zhiguo, WANG En de, FU Jianfei, et al. Spatiotemporal variability of groundwater level in China's Hebei Plain[J]. Journal of Northeastern University: Nature Sciences, 2007, 28(5): 717-720. (in Chinese))
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, Italy, 1998.

(上接第 759 页)

- [9] 马天, 黄建国, 胡方. 基于 PC 机群的多通道视景仿真系统的研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6053-6056. (MA Tian, HUANG Jianguo, HU Fang. Research on multichannel visual system based on pc cluster[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6053-6056. (in Chinese))
- [10] 彭玉元, 姜林晖. 基于 Virtools 的三维虚拟校园漫游系统的实现[J]. 广西工学院学报, 2009, 20(4): 60-64. (PENG Yuyuan, JIANG Linhui. Design and implementation of three dimensional virtual interactive campus system[J]. Journal of Guangxi University of Technology, 2009, 20(4): 60-64. (in Chinese))
- [11] 邹湘军, 孙健, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909. (ZOU Xiangjun, SUN Jian, HE Hanwu, et al. The development and prospects of virtual reality[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1905-1909. (in Chinese))
- [12] 高红森, 栗继组. 基于 3D 和 VIRTTOOLS 的煤矿安全行为模拟[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(1): 106-109. (GAO Hongsen, LI Jizu. Research on safety behavior simulation in coal mine based on the 3d and virttools technologies[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, 41(1): 106-109. (in Chinese))
- [13] 成鹏, 陈蓓青. 三峡工程永久船闸单级闸室仿真系统制作简介[J]. 人民长江, 2012, 43(8): 116-118. (CHENG Peng, CHEN Beiqing. Introduction to simulation system development of single chamber of tgp's permanent ship lock[J]. Yangtze River, 2012, 43(8): 116-118. (in Chinese))
- [14] 黄静, 张红忠. 3dsmax 在虚拟现实中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(2): 124-126. (HUANG Jing, ZHANG Hongzhong. Application of 3dsmax in virtual reality[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(2): 124-126. (in Chinese))
- [15] 盖龙涛, 陈月华. 基于 Virtools 的交互式操作模型系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2009(29): 308-310. (GAILongtao, CHEN Yuehua. Design and implementation of interactive operation model system based on virttools[J]. Journal of Computer Applications, 2009(29): 308-310. (in Chinese))