



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.009

杨柳, 陈喜, 章树安, 等. 基于地表-地下水文过程模拟的农业灌溉开采量估算[J]. 2016, 14(1): 54-58.

YANG Liu, CHEN Xi, ZHANG Shu an, et al. Estimation of groundwater withdrawal for agricultural irrigation based on surface groundwater hydrological simulation[J]. 2016, 14(1): 54-58. (in Chinese)

基于地表-地下水文过程模拟的农业灌溉开采量估算

杨 柳^{1,2}, 陈 喜^{1,2}, 章树安³, 张志才^{1,2}, 张俊芳^{1,2}, 高 满^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 3. 水利部 水文局, 北京 100053)

摘要: 通过发展新安江模型中非饱和带、饱和含水层水量平衡计算及入渗补给、潜水蒸发、河流-地下水水量交换动态模拟功能, 在对作物灌溉需水量的估算基础上, 利用河流流量和地下水埋深观测资料进行模型反演, 实现对灌溉开采量的估算。在淮北平原沙颍河流域井灌区应用表明, 该方法不仅较好地模拟河川径流和地下水埋深动态变化, 而且较好地估算出灌溉开采量动态变化过程及其对地下水埋深的影响。地下水开采量估算及地下水位动态变化对地下水控制管理具有重要价值。

关键词: 地下水开采量; 水文模拟; 新安江模型; 农灌区

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0054-05

Estimation of groundwater withdrawal for agricultural irrigation based on surface groundwater hydrological simulation

YANG Liu^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, ZHANG Shu an³, ZHANG Zhi cai^{1,2}, ZHANG Jun fang^{1,2}, GAO Man^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: In this study, we developed a "Xinanjiang" model in balancing water storage of both unsaturated and saturated zones, then quantified precipitation recharge, groundwater evapotranspiration, and exchange between river flow and groundwater flow. The model was used to calibrate irrigation amount in terms of both observed flow discharge and depth to groundwater table, and estimated irrigation demand of crops. The established method was further applied in the irrigated area of Shaying River Basin, one of plain areas in Huhai River. The results indicated that our method not only well simulate river flow discharge and depth to groundwater table, but also reliably estimate variation of groundwater withdrawal and its influence on changes of groundwater table. Estimation of groundwater withdrawal and variation of groundwater level is very valuable for management of groundwater resources.

Key words: groundwater withdrawal; hydrological simulation; Xinanjiang Model; irrigation area for agriculture

我国正在开展将地下水取水总量管理和地下水位控制管理相结合的“双控”管理模式, 其中地下水取水量估算由于农灌区机井分布面广量大, 统计费时费力, 而且大都给出年统计值, 缺乏年内动态变化

过程。目前常用的地下水开采量估算方法包括以下几种。(1) 统计方法。如统计不同作物灌溉定额、机井耗电量推算开采量等^[1]。(2) 遥感方法。根据遥感估算作物蒸腾量 ET 、土壤水分状态以及作物缺

收稿日期: 2015-09-26 修回日期: 2015-12-16 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1621.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41401029); 河南理工大学博士基金(B204-071)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41401029); Doctor Foundation in Henan Polytechnic University(B204-071)

作者简介: 杨柳(1988-), 女, 河北邢台人, 主要从事地下水数值模拟及开发利用研究。Email: fyf10824@163.com

通讯作者: 陈喜(1964-), 男, 江苏淮安人, 教授, 博士, 主要从事地下水及水文数值模拟研究。Email: xichen@hhu.edu.cn

水量, 结合灌溉用水量调查, 实现在农田尺度作物灌溉用水量的估算^[2,4]。(3) 水量平衡方法。根据含水层水量平衡以及地下水开采对地下水位动态的影响, 估算地下水开采量^[5]。(4) 水文模型方法。基于水均衡原理, 利用集总式和分布式水文模型, 以地下水位、河流流量模拟反演开采量以及不同作物在不同时间尺度内开采量变化过程, 如李玲等^[6]和 Shao 等^[7]等通过建立华北平原地下水数值模型, 利用模拟水位与实际水位拟合, 反演华北平原开采量; Ruud 等^[8]、Perrin 等^[9]和 Liu 等^[10]建立不同土地利用下水量平衡模型或通过独立分量分析法(ICA)和地下水数值模型结合, 利用地下水位动态模拟估算开采量。

上述水文模型方法大都仅根据地下水位动态反演开采量, 由于模型参数众多, 反演的开采量不大确定。本文根据 FAO 提供的作物实际蒸发蒸腾量估算方法, 基于新安江模型产汇流过程, 发展考虑井灌区地下水开采对非饱和带土湿和含水层地下水位动态影响模拟功能, 通过对河流流量和地下水位动态模拟反演开采量, 实现对地下水开采量的估算。

1 基本原理

1.1 农灌区地表-地下水水文过程概化

农灌区地下水开采对地表和地下水水文过程影响可以表述为图 1, 空间结构沿垂向上分为作物冠层、非饱和带、饱和带, 当降水充足时, 降水入渗补充非饱和带作物根系层土壤含水量, 如土壤水分满足作物需水量, 无需灌溉; 降水(P)形成地表径流(R_s)和壤中流(R_i), 部分渗漏补充饱和地下水(P_{rg})。在干旱无雨期, 蒸散发强烈, 土壤水分下降, 如土壤水分不能满足作物需水量时, 需要灌溉; 灌溉水(W_g)以降水形式补充土壤非饱和带缺水量, 但不产生地表径流, 部分被作物吸收, 部分滞留于非饱和带或渗漏到饱和带。与此同时, 在毛细作用下潜水向上补充非饱和带土壤水分(E_g), 即潜水蒸发。当潜水水位高于河水位时形成河道基流(R_g)。

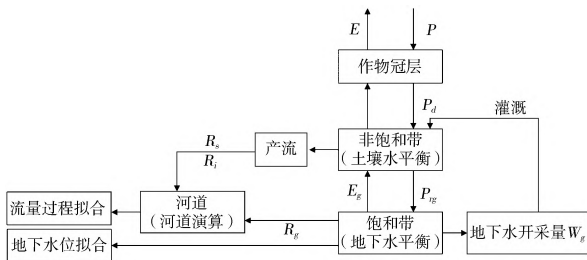


图 1 农灌区地表-地下水水文过程

Fig. 1 Surface-groundwater hydrological processes in irrigation area of agriculture

1.2 流域产流量和土壤蓄水量推求

非饱和带水量平衡计算公式如下:

$$P_{dp} = E + P_{rg} + R_s + R_i - E_g + W_2 - W_1 \quad (1)$$

式中: P_{dp} 为降雨量(P)或灌溉水量(P_d); E 为实际蒸散发量; P_{rg} 为降雨入渗补给量或灌溉回归水量; E_g 为潜水蒸发量; R_s 为地表径流量; R_i 为壤中流; W_1 、 W_2 分别为时段初和时段末土壤蓄水量。根据新安江模型蓄满产流机制^[11]计算降雨形成的径流深 R (包括 R_s 、 R_i 以及 P_{rg} 再经过地下水库调蓄的地下径流量)。

新安江模型中全流域平均土壤蓄水容量 WM 为包气带某一厚度 h 内凋萎含水量 θ_{WP} 与田间持水量 θ_{FC} 之间差值^[12], 即: $WM = (\theta_{FC} - \theta_{WP})h$, 某一时段(如时段末)土壤蓄量 W_2 与流域平均土壤含水率 θ 关系为

$$\theta = \frac{W_2}{h} + \theta_{WP} \quad (2)$$

1.3 地下水水平衡项推求

井灌区灌溉水量来源于含水层, 含水层中地下水水量平衡计算公式为

$$P_g = R_g + E_g + W_g + \Delta S_g \quad (3)$$

式中: R_g 为地下水蓄水库出流量(基流量); W_g 为地下水开采量; ΔS_g 为流域平均地下水蓄变量。上式 ΔS_g 可以由时段初、末地下水埋深 d_1 、 d_2 表示:

$$\Delta S_g = \mu(d_1 - d_2) \quad (4)$$

式中: μ 为给水度。

降雨入渗补给和灌溉回归水量按下式计算:

$$P_g = (P_{\phi} - E) \left(\frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_s - \theta_{WP}} \right)^a \quad (5)$$

式中: θ_s 为饱和含水量; a 为常数。

潜水蒸发量 E_g 采用阿维里扬诺夫公式计算:

$$E_g = E_p \left(1 - \frac{d}{d_{max}} \right)^n \quad (6)$$

式中: d 、 d_{max} 分别为地下水埋深和临界埋深; n 为经验常数。

地下水补给河流量 R_g 计算式^[13]为

$$R_g = K(d_{riv} - d) \quad (7)$$

式中: K 为出流系数; d_{riv} 为河流水深。

如考虑地下水埋深空间分布影响, 假定其服从 Gamma 分布^[14-15]。

$$f(d_{gw}) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} d_{gw}^{\alpha-1} e^{-\lambda d_{gw}}, \alpha > 0, \lambda > 0 \quad (8)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数; α 为形状参数; λ 为尺度参数, 则流域平均地下水埋深值为 Gamma 分布的数学期望: $d = \alpha/\lambda$ 。则流域地下水出流量 R_g 和潜水蒸发量 E_g 可表示为

$$R_g = K \int_{d_{gw}=0}^{d_{gw}=d_{riv}} f(d_{gw})(d_{riv} - d_{gw})d(d_{gw}) \approx$$

$$\frac{K(\frac{\alpha}{d})^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^m e^{-\frac{\alpha}{d}(\frac{id_{riv}}{m})} (\frac{id_{riv}}{m})^{\alpha-1} (d_{riv} - \frac{id_{riv}}{m}) \frac{d_{riv}}{m} \quad (9)$$

$$E_g \approx \frac{E_p(\frac{\alpha}{d})^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^m e^{-\frac{\alpha}{d}(\frac{id_{max}}{m})} (\frac{id_{max}}{m})^{\alpha-1} (1 - \frac{i}{m})^n \frac{d_{max}}{m} \quad (10)$$

式中: i 为流域地下水埋深空间位置。

由式(5)、(9)、(10)、(14) 计算流域内地下水蓄水库的补给量和排出量, 带入式(3) 求出时段内流域平均地下水蓄变量 ΔS_g , 再由式(4) 推求出时段末地下水埋深 d_2 。

流域地表径流直接进入河道, 壤中流经过线性水库调蓄后到达河道, 地下径流经上述地下水蓄水库出流到达河道, 最终三者经过马斯京根演算汇流至出口断面。

1.4 农田蒸散发及灌溉水量初步估算

在农灌区, 根据作物实际蒸发蒸腾量、根系层水分状况估算灌溉水量。实际蒸发蒸腾量受供水条件等限制, 可采用下式计算^[16]:

$$E = (K_s K_{cb} + K_e) E_p \quad (11)$$

其中:

$$K_s = \begin{cases} \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - \rho)TAW} & D_r > RAW \\ 1 & D_r \leq RAW \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_p 为蒸散发能力, 利用气象资料 and Penman Monteith 公式计算^[17]; K_s 为土壤水分胁迫系数; K_{cb} 为基础作物系数, 采用 FAO-56 推荐的不同湿润频率和气候条件下基础作物系数值; K_e 为表层土壤蒸发系数, 受蒸散发能力和土壤供水能力双重限制, 裸土期该系数近似等于初期的系数^[17-18]; TAW 为根系区土壤蓄水容量; D_r 为根系区土壤缺水水量 ($TAW = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) Z_r$, $D_r = (\theta_{fc} - \theta) Z_r$, 其中, Z_r 为根系深度)。冬小麦、夏玉米根系深度主要集中在 0~1 m 深土层^[19-20], 因此本文中设定根系深度变化范围为 0~1 m。

灌溉时间取决于作物类型和土壤水分缺失程度, 根据 FAO-56, 当根系内土壤缺水水量 D_r 达到某一最大缺水水量 RAW ($RAW = \rho \cdot TAW$) 开始灌溉, 其中, ρ 为水分胁迫发生前根系层消耗的土壤水分占总有效土壤水比例, 随作物种类、蒸发蒸腾量 E 的大小而变化, 计算公式^[21] 如下:

$$\rho = \frac{1}{\alpha + \beta E} - 0.1(5 - NO_g) \quad (13)$$

式中: α 和 β 为回归系数, 分别等于 0.76 和 1.5^[21]; NO_g 为作物种类参数, 根据作物耐水分胁迫的程度确定。对于大多数作物, ρ 一般取值为 0.5^[17]。

当土壤水分过低, 植被蒸腾作用受到限制, 而土壤水分过高, 会引起虫病危害。最有利于作物生长发育的土壤水分含量, 即适宜土壤水分是确定合理灌溉的重要依据。试验表明, 适宜土壤水分上限指标为 85%~90% 田间可利用水量^[22] (本文取 85%)。当 $D_r \geq RAW$ 时, 开始灌溉, 则灌溉需水量估算值 $P_d = (\theta_{wp} + 0.85(\theta_{fc} - \theta_{wp}) - \theta) Z_r$ 。

根据地下水水量平衡式(3) 修正 P_d 推求灌溉开采量 W_g :

$$W_g = \beta P_d \quad (14)$$

式中: β 为修正系数。

2 应用实例

2.1 流域概况

研究区位于淮北平原沙颍河流域井灌区内(周口水文站以上至黄桥水文站), 面积为 733 km²; 属大陆季风气候, 多年平均降水量为 798.9 mm(1997 年-2008 年), 60%~80% 的降雨集中在 6 月-8 月份; 多年平均地下水埋深为 3.8 m, 最小埋深为 1.7 m, 最大埋深为 5.48 m。

农业以旱生作物为主, 种植面积最广为冬小麦和夏玉米, 冬小麦一般于 10 月 10 日播种, 次年约 6 月 7 日收获; 夏玉米于 6 月 19 日播种, 当年 9 月 23 日收获。研究区土壤类型主要为黄潮土, 根据杨楼实验流域实验分析^[23], 黄潮土壤 0~3 m 平均饱和含水率 θ 为 40%, 平均田间持水率 θ_{fc} 为 26.5%, 平均凋萎系数 θ_{wp} 为 12.6%。

2.2 流量和地下水埋深模拟

以 1997 年-2004 年为模型率定期, 2005 年-2008 年为验证期, 利用气象资料作为模型输入进行逐日演算, 采用流域出口断面 1997 年-2008 年逐月流量和每 5 日 11 眼机井平均地下水埋深变化过程进行模型参数率定和开采量推求。本文在以径流过程模拟与实测过程最优基础上, 进一步通过人工微调地下水蓄水库中参数, 使二者均达到较好的拟合精度。

(1) 流量过程拟合及验证。模型模拟的逐月流量过程见图 2, 率定期和验证期的纳什效率系数分别为 0.90 和 0.82, 模拟流量过程与实测总体一致。

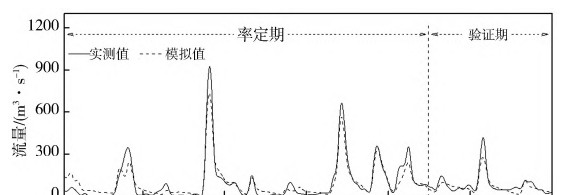


图 2 模拟和实测的逐月流量过程

Fig. 2 The monthly simulated and actual measured flow discharges

(2) 地下水埋深拟合及验证。在流量模拟较好的基础上, 以每 5 日流域平均地下水埋深拟合效果最佳为目标, 模拟和实测每 5 日区域平均地下水埋深变化过程见图 3, 率定期和验证期的确定性系数 R^2 分别为 0.83 和 0.72。模拟结果显示, 模型较好地模拟了流域平均地下水埋深变化。

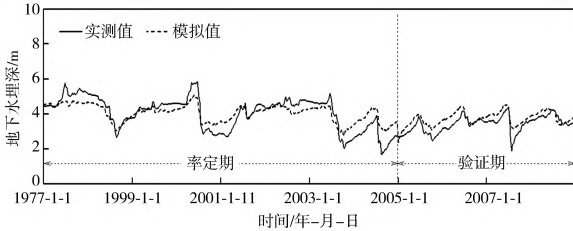


图 3 模拟和实测的每 5 日区域平均地下水埋深

Fig. 3 The simulated and actual measured regional mean depth to groundwater at a time interval of 5 days

2.3 灌溉开采量估算结果

图 4 为模型模拟的逐年开采量, 表明灌溉开采量大小受降水和蒸散发影响显著。降雨量大、蒸散发量小, 则灌溉量小, 反之, 则大, 如降雨量小于蒸散发量的 2001 年, 灌溉开采量为 173.8 mm; 而丰水

年 2003 年, 灌溉开采量仅为 52.5 mm。模型估算的多年平均开采量为 105.45 mm (0.77 亿 m^3), 与《淮河片水资源公报》(1997 年-2008 年) 提供的多年平均农田灌溉用水量 127 mm 接近。

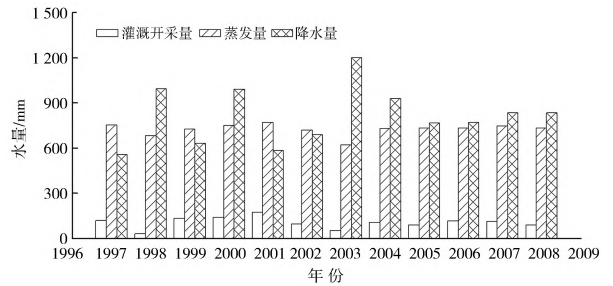


图 4 1997 年-2008 年年降水量、蒸散量和灌溉开采量

Fig. 4 Annual precipitation, evapotranspiration and groundwater withdrawal from 1997 to 2008

冬小麦、夏玉米全生育期分为四个生育阶段^[17], 不同阶段估算的灌溉开采量见表 1。由表 1 知, 冬小麦灌溉开采量最多的是拔节-抽穗期, 其次是抽穗-灌浆期, 这两个时期灌溉开采量占冬小麦整个生育期的 83.3%。夏玉米灌溉开采量比冬小麦小很多, 在生长期, 抽穗-灌浆期和灌浆-收获期灌溉开采量较大。

表 1 冬小麦、夏玉米各生长期长度及灌溉开采量

Tab. 1 The length of each growing period and groundwater withdrawal for winter wheat and summer maize

作物	项目	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	灌浆-收获	全生育期
冬小麦	生育期长度/d	140	61	25	15	241
	灌溉开采量/mm	8.07	40.96	35.75	7.26	92.04
夏玉米	生育期长度/d	38	14	11	34	97
	灌溉开采量/mm	2.17	0	4.94	6.30	13.41

冬小麦、夏玉米逐月灌溉开采量估算见图 5, 冬小麦 4 月-5 月灌溉开采量最大, 占小麦全生育期灌溉开采量的 82.8% (图 5(a)); 夏玉米灌溉开采量 8 月达到最大值, 占全生育期灌溉开采量的 47.2% (图 5(b))。逐月开采量变化反映两种作物的灌溉需水规律^[24], 如全年灌溉开采量高峰的 4 月-8 月份是冬春作物生长旺盛和春秋作物播种造墒用水较大的时期^[23]。

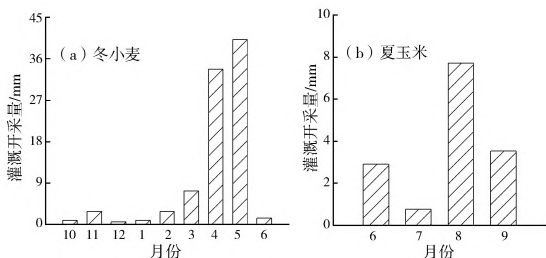


图 5 冬小麦和夏玉米每月平均灌溉开采量

Fig. 5 Monthly average groundwater withdrawal for winter wheat and summer maize

根据估算的灌溉开采量和实测地下水位资料, 进一步分析小麦、玉米生长期灌溉开采量与实测地下水位变化之间相关关系 (图 6)。由于 3 月-5 月是小

麦生长期, 且降水量较小, 难以满足作物需水量, 需要开采地下水进行灌溉, 因此地下水位变化与灌溉开采量存在显著的负相关关系 (图 6(a))。6 月-9 月为夏玉米的生长季节, 是一年中降雨量相对丰沛的雨季, 且夏玉米灌溉需水量相对较小, 所以地下水位变化与灌溉开采量之间虽然也存在负相关关系 (图 6(b)), 但二者相关性相对较弱。

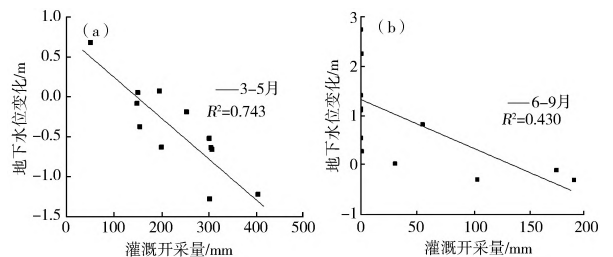


图 6 灌溉开采量与地下水位变化关系

Fig. 6 The relationship between groundwater withdrawal and change in groundwater level

3 总结

井灌区地下水开采量估算及其对地下水位影响是地下水“双控”管理的难题之一。本文基于水量平

衡的原理,在作物灌溉需水估算的基础上,通过改进新安江模型实现对地表-地下水过程模拟,估算农灌区灌溉开采量的年、作物生长季节以及逐月变化。在颍河流域井灌区应用表明,该地区年平均灌溉开采量为0.77亿 m^3 ,年季变化与气候条件和作物类型有关,冬小麦灌溉开采量远比夏玉米大。冬小麦拔节-抽穗期和抽穗-灌浆期灌溉开采量占整个生育期的83.3%,夏玉米在抽穗-灌浆期和灌浆-收获期灌溉开采量大。作物生长季灌溉开采量与实测地下水位变化相关关系分析表明,灌溉开采是该流域地下水位变化的主导因素,且冬小麦季节比夏玉米季节地下水位变化与灌溉开采量的负相关关系更为显著。但受到模型参数不确定性影响,该方法应用如进一步结合典型区不同作物类型灌溉开采量调查资料、灌溉制度和方式等,才能增强模型估算结果的可靠性,并在其他类型条件地区推广应用。

参考文献(References):

- [1] 李征. 地下水开采量计算方法概述[J]. 海河水利, 2014(1): 34-36. (LI Zheng. Overview of the calculation method of groundwater withdrawal[J]. Haihe Water Resources, 2014(1): 34-36. (in Chinese))
- [2] Hunink J E, Contreras S, Soto Garca M, et al. Estimating groundwater use patterns of perennial and seasonal crops in a Mediterranean irrigation scheme, using remote sensing[J]. Agricultural Water Management, 2015, 162: 47-56.
- [3] Cruz Blanco M, Lonte I J, Santos C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 135-145.
- [4] Bastiaanssen W G, Feddes R A. A new technique to estimate net groundwater use across large irrigated areas by combining remote sensing and water balance approaches, Rechna Doab, Pakistan[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(5-6): 653-664.
- [5] Mart nez Santos P, Mart nez Alfaro P E. Estimating groundwater withdrawals in areas of intensive agricultural pumping in central Spain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 172-181.
- [6] 李玲, 邵景力, 崔亚莉, 等. 华北平原区地下水开采量估算研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 82-85. (LI Ling, SHAO Jing-li, CUI Ya-li, et al. Estimation of groundwater withdrawal in the North China Plain[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 81-85. (in Chinese))
- [7] Shao J, Cui Y, Hao Q, et al. Study on the estimation of groundwater withdrawals based on groundwater flow modeling and its application in the North China Plain[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(6): 1033-1042.
- [8] Ruud N, Harter T, Naugle A. Estimation of groundwater pumping as closure to the water balance of a semi arid, irrigated agricultural[J]. Journal of Hydrology, 2004, 297(1-4): 51-73.
- [9] Perrin J, Ferrant S, Massuel S, et al. Assessing water availability in a semi arid watershed of southern India using a semi distributed model[J]. Journal of Hydrology, 2012, 460: 143-155.
- [10] Liu H, Hsu N, Yeh W W. Independent component analysis for characterization and quantification of regional groundwater pumping[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 505-516.
- [11] 赵人俊. 流域水文模型-新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZHAO Renjun. Watershed Hydrological Modeling-Xinjiang Model and Shanbei Model[M]. Beijing: China Water Power Press, 1984. (in Chinese))
- [12] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (ZHAO Renjun. Watershed Hydrological Modeling Xinjiang Model and Shanbei Model[M]. Beijing: China Water Power Press, 1984. (in Chinese))
- [13] Harbaugh A W. MODFLOW 2005, the US Geological Survey modular groundwater model: The groundwater flow process[M]. Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.
- [14] Beldring S, Gottschalk L, Seibert J, et al. Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98: 305-324.
- [15] Yeh P J, Eltahir E A. Representation of water table dynamics in a land surface scheme. Part II: Subgrid variability[J]. Journal of Climate, 2005, 18(12): 1881-1901.
- [16] Allen R G, Smith M, Perrier A, et al. An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration[J]. ICID Bulletin, 1994, 43(2): 1-34.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome. 1998, 300(9): D5109.
- [18] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 27-41.
- [19] 戴俊英, 鄂玉江, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究-玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系[J]. 作物学报, 1988, 14(4): 310-314. (DAI Junying, E Yujian, GU Weilian. Studies on the relationship between root growth and yield in maize (zea mays)-The interaction of root system and leaves of maize and its relation with yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 1988, 14(4): 310-314. (in Chinese))
- [20] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2024-2027. (LIU Ronghua, ZHU Zixi, FANG Wensong, et al. Distribution pattern of winter wheat root system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 2024-2027. (in Chinese))
- [21] Diepen C V, Rappoldt C, Wolf J, et al. CWFS Crop Growth Simulation Model WOFOST. Documentation Version 4.1[J]. Center for World Food Studies, Wageningen. 1988. 请核实
- [22] 王宝英, 张学. 农作物高产的适宜土壤水分指标研究[J]. 灌溉排水, 1996, 15(3): 35-39. (WANG Baoying, ZHANG Xue. Studies on Optimum Moisture Index for High Yield of Crops[J]. Irrigation and Drainage, 1996, 15(3): 35-39. (in Chinese))
- [23] 王振龙, 章启兵, 李瑞. 淮北平原区水文实验研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011. (WANG Zhenlong, ZHANG Qibing, LI Rui. Hydrological Experiments in Huabei Plain[M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2011. (in Chinese))
- [24] 彭世彰, 朱成立. 作物节水灌溉需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2003(2): 5-8. (PENG Shizhang, ZHU Chengli. Study on the water requirement rules of crops under water saving irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2003(2): 5-8. (in Chinese))