

平原区浅层地下水管理控制水位划定方法研究

潘登^{1,4}, 张艳芳^{1,4}, 胡浩东^{2,3}, 王涵², 窦明^{2*}

(1.河南省自然资源监测和国土整治院, 郑州 450016; 2.郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3.宁波市水利水电规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000; 4.河南省自然资源科技创新中心 地下水资源调查监测研究, 郑州 450016)

摘要:【目的】基于落实最严格水资源管理制度的需求, 提出适用于平原区浅层地下水管理控制水位的划定方法。【方法】根据濮阳市浅层地下水开采特点, 在对地下水均衡法、疏干体积法、时间序列法等方法改进基础上, 研究提出研究区地下水管理控制水位指标。【结果】时间序列法仅适用于地下水开发利用方式不发生较大变化的区域; 地下水均衡法和疏干体积法在划定管理控制水位过程中均考虑研究区未来水资源条件及相应的管控政策, 但由于疏干体积法按照县级行政区划来划分管理单元, 未考虑水文地质条件差异的影响, 故在分解到代表性监测井时二者水位变幅差别较大; 地下水均衡法全面考虑了当前地下水开发和利用条件、水文地质条件以及地下水管理措施等因素, 划定结果与实际更相符。【结论】改进的地下水均衡法划定结果与实际更相符, 更适用于平原区浅层地下水管理控制水位的划定。

关键词: 浅层地下水; 管理控制水位; 水位划定方法; 濮阳

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022597

OSID: 

潘登, 张艳芳, 胡浩东, 等. 平原区浅层地下水管理控制水位划定方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 86-92, 130.
PAN Deng, ZHANG Yanfang, HU Haodong, et al. Comparative Study of Methods for Evaluating Shallow Groundwater in Plain Areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 86-92, 130.

0 引言

【研究意义】我国华北地区地下水超采问题日益严重, 许多学者从法律制度体系^[1]、压采治理手段^[2]、地下水涵养保护^[3]、水循环调节改善^[4]等方面对地下水治理工作进行了摸索探讨。加强地下水位管控, 既是《地下水管理条例》的要求, 也是地下水精细化管理的需要^[5]。【研究进展】目前, 地下水管控阈值的确定主要从地下水位和地质构造的内在关系开展研究, 包括地下水位与地面沉降、水资源量化管理、海水入侵等地质灾害的联系。例如, 袁长极^[6]和郭占荣等^[7]讨论了地下水控制水位的概念和内涵; 方樟等^[8]模拟了地下水流在不同降水频率下的管控水位; 姜晨光等^[9-10]通过建立城市地面沉降的模型, 阐述了城市地下水位与地面沉降的关系; 谢新民等^[11]和于璐等^[12]给出了地下水管理控制水位的分级标准; 梅梓腾等^[13]、牛二伟^[14]分别对太原和长治盆地的地下水位、水量开展了双控管理目标研究; 蒋咏等^[15]提出了江苏省地下

水红线水位的评估方法; 窦明等^[16]和李忠国等^[17]分别研究了深层承压含水层和海水入侵区的地下水开采量阈值^[17]。另外, 还有学者针对地下水位和生态环境的相互影响进行了研究, 如杨泽元等^[18]、张惠昌^[19]、孙才志等^[20]分别研究了陕北风沙滩地、河西走廊干旱区、下辽河平原地区地下水埋深与野生植被生长的关系, 并提出基于生态安全保障目标下的地下水埋深指标。【切入点】目前有关平原区浅层地下水管理控制水位的内涵解读、划定方法尚不明确, 造成划定结果各异。故为统筹考虑各区域实际, 开展对平原区浅层地下水管理控制水位使用更符合实际的划定方法研究。【拟解决的关键问题】为此, 以濮阳市浅层地下水超采区为例, 对比改进的地下水均衡法、疏干体积法和时间序列法对地下水管理控制水位划定结果的异同, 为平原区浅层地下水管理控制水位划定提供参考借鉴。

1 研究方法及其改进

地下水管理控制水位 (Groundwater Management and Control Water Level, GMCWL), 是从地下水管理与保护需求出发, 根据区域地下水开发利用现状和今后社会经济发展用水需要, 针对丰水年、平水年、枯水年等不同降水条件, 确定满足未来一定管理目标下的地下水位控制阈值。平原区浅层地下水由于受地

收稿日期: 2022-10-25 修回日期: 2023-03-29 网络出版日期: 2023-05-10
基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (21A570008); 中国地质调查局地质调查基金项目 (DD20211256)
作者简介: 潘登 (1985-), 男, 河南汝州人。高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水资源调查监测研究工作。E-mail: 97522965@qq.com
通信作者: 窦明 (1975-), 男, 山东桓台人。教授, 博士, 主要从事水文水资源研究工作。E-mail: dou_ming@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

形地貌、降水、地表水补给以及人类开采活动等影响，呈现出动态变化幅度大的特点。目前关于地下水管理控制水位的划定方法可概括分为2类：一类是不针对具体问题和对象的普适性方法，如时间序列法、回归分析法、疏干体积法、地下水均衡法、数值模拟法等；另一类是针对地下水开采引发的特殊问题提出相应方法，如地面塌陷算法、泉流量动态分析法等。相对而言，前一类方法更具普适性。为了比较不同方法的优缺点，根据典型研究区濮阳市地下水开采特点，采用地下水均衡法、疏干体积法、时间序列法的改进方法，对当地地下水埋深进行预测并划定相应的管理控制水位。

1.1 基于改进水均衡法的 GMCWL 划定方法

地下水均衡法是以区域含水层作为水均衡单元，按照水量平衡原理，分析单元在某一时期内地下水系统补给和排泄关系的方法。传统地下水均衡法采用各补给项和排泄项的多年均值来计算，传统的水均衡法只有在规划年设置在平水年条件下，结果精度更大。如果规划年遭遇丰水年或枯水年，则会导致计算结果偏大或偏小，故不利于对地下水开发利用的有效管控。为此，应针对不同来水条件预测地下水位变幅，进而推求控制水位范围。采用改进后的地下水均衡法划定管理控制地下水位步骤为：

- 1) 根据当地的水文地质条件划分若干均衡区，并以此作为地下水位管理单元。
- 2) 采用水文频率曲线法推求丰水年、平水年和枯水年，并给出不同典型年下的降水补给条件。
- 3) 根据水量平衡计算原理，计算不同典型年下的地下水资源量均衡差。

$$Q_B - Q_P \pm \Delta W = X, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{X}{Q_B} \times 100\%, \quad (2)$$

式中： Q_B 为地下水总补给量（万 m^3 ）； Q_P 为地下水总排泄量（万 m^3 ）； ΔW 地下水蓄变量（万 m^3 ）； X 为地下水均衡差（ km^2 ）； δ 为相对均衡差，对于平原地区要求 $|\delta| \leq 20\%$ 。在《水资源调查评价》和《地下水资源量与开采量补充细则》规定中，对平原区地下水均衡计算精度要求，即 $|\delta| \leq 20\%$ 。

- 4) 如计算精度满足要求，进一步求出不同典型年地下水位变幅：

$$\Delta h_F = \frac{Q_{F,B} - Q_{F,P}}{10^2 \cdot \mu \cdot F}, \quad (3)$$

$$\Delta h_K = \frac{Q_{K,B} - Q_{K,P}}{10^2 \cdot \mu \cdot F}, \quad (4)$$

式中： $Q_{F,B}$ 、 $Q_{F,P}$ 、 $Q_{K,B}$ 、 $Q_{K,P}$ 分别为丰水年地下水总补给量（万 m^3 ）、丰水年地下水总排泄量（万 m^3 ）、

枯水年地下水总补给量（万 m^3 ）和枯水年地下水总排泄量（万 m^3 ）； μ 为地下水位变幅带的给水度； F 为均衡单元面积（ km^2 ）； Δh_F 为均衡期遭遇丰水年时的地下水位变幅（m）； Δh_K 为均衡期遭遇枯水年时的地下水位变幅（m）；根据各单元在基准年的初始水位可推算至均衡期的最终水位。

- 5) 依据求出的规划水平年地下水位变幅控制区间（ $\Delta h_K \sim \Delta h_F$ ），再结合未来地下水管理目标要求确定各管理单元的管理控制水位。

1.2 基于改进疏干体积法的 GMCWL 划定方法

疏干体积法是根据某一时期和某一区域内地下水含水层的疏干程度来预测地下水位变幅的方法。该方法适用于颗粒厚度均一的地下含水层，其原理也是基于水量平衡理论。由于影响含水层水位的因素主要是降水量和开采量，因此采用多年平均降水量来表示含水层的补给项，采用2030年规划水平年的地下水开采量来表示含水层的排泄项，则用含水层的水位变化来反映其蓄变量的变化程度。在规划水平年，如果降水量变化不大，那么目标年的地下水位变幅就主要受在此期间的地下水开采量影响；如果降水量遭遇丰水年或枯水年，则要考虑降水条件变化的影响，由此法推求出来的目标年管理控制水位是一个区间值。改进后的疏干体积法考虑了降水量变化的影响，其计算式为：

$$H_m = H_c - \frac{\eta \cdot Q}{10^2 \cdot \mu \cdot F}, \quad (5)$$

式中： H_m 为管理单元的地下水管理控制水位（m）； H_c 为管理单元的初始平均地下水位（m）； η 为地下水开采量压减校核系数，平水年时该值为1，丰水年时该值增大，枯水年时该值减小； Q 为地下水开采总量压减指标（万 m^3 ）；其他符号意义同上。

由于降水量的变化会影响目标年的管控地下水位，因此使用地下水初始水位进行校验。改进后的初始水位计算式为：

$$H_c = H_0 + \alpha \frac{P_1 - P}{\mu}, \quad (6)$$

式中： H_0 为基准年代表井的初始水位； P_1 为基准年降水； P 为多年平均降水量； α 为降水量入渗补给系数。

1.3 基于时间序列法的 GMCWL 划定方法

时间序列法是一种利用过去变动趋势预测未来发展规律的统计分析方法，适用于处于平稳和持续发展过程中的事物预测。通常，一组时间序列数据可看成由长期趋势项、周期变动项和随机干扰项等要素组成。在建立时间序列模型时，首先要识别数据序列的各种成分，再剔除其中的趋势项和周期项，剩余随机项按平稳过程处理。常用的时间序列法有滑动平均法、加权滑动平均法、自回归法、自回归滑动平均法、函

数拟合法等多种。其推求管理控制水位的流程大致如下：①选择观测时间序列较长的代表性监测井，对地下水位数据整理后得到长序列观测数据；②采用统计学方法提取数据序列的趋势项、周期项和随机项，排除干扰因子影响，得到趋势变化平稳的数据序列；③选取适宜的时间序列预测方法，结合实测数据进行函数拟合，并对预测结果进行检验和误差分析；④对于满足检验精度要求的数据序列，结合未来变化趋势推求的水位变幅，并依此划定管理控制水位。其计算式为：

$$W(t)=Q(t)+Z(t)+S(t), \quad (7)$$

式中： t 为时间； $W(t)$ 为地下水位数据序列； $Q(t)$ 为水位变化趋势项； $Z(t)$ 为水位变化周期项； $S(t)$ 为由于各种因素引发的随机干扰项。

首先识别地下水位数据序列的趋势性，并提取趋势项，借助相关系数 R 来判别其趋势成分的显著性。在该地下水数据序列分离其趋势成分后，进一步对剩余数据序列分析周期项。将趋势成分和周期成分都剥离后，剩余的随机项可近似看作是在一种平稳的起伏变化数据序列，可采用自回归模型来描述：

$$R(t)=\phi_1 x_{t-1}+\phi_2 x_{t-2}+\dots+\phi_p x_{t-p}+\varepsilon_t, \quad (8)$$

式中： ϕ_n ($n=1, 2, \dots, p$) 为自回归系数； p 为模型阶数； x_{t-n} 为随机项； ε_t 为随机序列。

2 研究区概况

2.1 研究区选择

濮阳市位于黄河下游和河南省东北部，地处冀、鲁、豫三省交界处，东西长约 125 km，南北宽约 100 km，濮阳市总面积为 4 188 km²。近年来，地下水开采量不断增加，其中濮阳市的华龙区、清丰县和南乐县等均出现了不同程度的地下水超采问题。因此，选择濮阳市作为划定平原浅层地下水管控水位的典型研究区。全市平原地区普遍存在浅层地下水，由于浅层地下水补给速度快、储藏条件好和富水性好等特点，所以濮阳市开发利用地下水含水层组以浅层含水层组为主。为了比较不同方法的优缺点，针对当地地下水的赋存条件和开采强度，选取时间序列法、疏干体积法和地下水均衡法的改进方法，预测当地地下水埋深动态并划定地下水管理控制水位。

2.2 水位动态变化情况

20 世纪 70 年代以前，濮阳市的地下水埋深一般在 4 m 以下，2001—2014 年濮阳市区、清丰县、南乐县地下水位平均下降速率分别为 0.23、0.18、0.15 m/a，这些地区也是濮阳市浅层地下水超采区的主要范围。濮阳市代表井在 21 世纪初期的地下水埋深见图 1。

由图 1 可知，濮阳市浅层地下水位下降较大的地区主要是华龙区、清丰县、南乐县，局部地区地下水超采严重，而濮阳县、范县、台前县由于靠近黄河，补给条件较好，故地下水埋深较小。

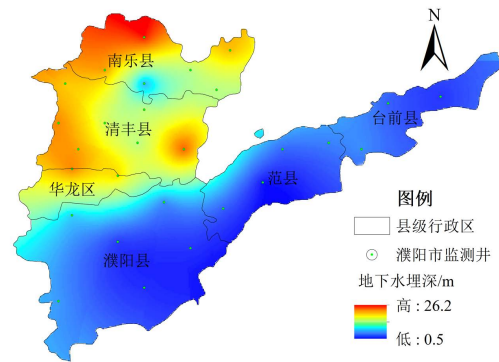


图 1 濮阳市代表井的初始地下水埋深

Fig.1 Initial burial depth of water level at representative wells in Puyang

2.3 开采总量压减指标的确定

地下水开采量压减指标的确定，需充分考虑濮阳市未来水资源需求、水利工程布局、水源置换条件等因素，并结合当地的地下水超采区治理规划、可能引发的生态环境地质问题和地下水保护目标，从供给侧与需求侧同时考虑当地的压减潜力，并将其分解到各县级管理单元。基于此，本文在借鉴《河南省地下水超采区治理规划》《河南省南水北调受水区地下水压采实施方案》和《河南省重点区域地下水超采治理与保护方案》等报告成果基础上，确定了濮阳市各区县的地下水开采量压减目标。规划目标年取 2030 年，届时全市总压减指标为 5 930 万 m³，其中华龙区 929 万 m³，濮阳县 576 万 m³，清丰县 2 195 万 m³，南乐县 1 824 万 m³，范县 90 万 m³，台前县 316 万 m³。

3 结果与分析

3.1 地下水均衡法的管理控制水位划定结果

濮阳市浅层地下水系统是开放的系统，主要有地表水、降水和灌溉回渗等其他垂向入渗补给输入地下水系统，排泄输出则主要通过潜水蒸发、人工开采和侧向径流等。根据含水层完整性、水文地质特征和流域水资源分区等，把其浅层地下水分为黄河内滩（I）、金堤河天然文岩渠（II）、徒骇马颊河（III）和章卫河平原（IV），然后按照各区域的含水性、地下水埋深和行政分区边界等进行细分，得到 8 个管理单元（图 2）。

采用地下水均衡法推求管理控制水位包括确定典型年、选取研究区评价参数、计算均衡期补给量和排泄量和划定管理控制水位。典型年确定采用 1980—2012 年濮阳市年降水量序列作 P-III 频率曲线，

从中查取 25%（2004 年）、50%（2007 年）和 75%（2006 年）频率下水平年对应的降水量，看作该地区丰水年、平水年、枯水年典型年的参考降水量。关于水文地质参数（包括降水入渗系数和灌溉入渗补给系数等）的选用需考虑地下水位动态、地表岩性特征、包气带及含水层厚度等因素，根据《河南省地下水资源评价》并结合濮阳市实际情况进行选择。研究区的地下水补给量主要分为 4 项：降水入渗补给量、渠系渗漏补给量、河道渗漏补给量和井灌田间补给量。降水入渗补给量通过选用合适的入渗补给系数来计算其入渗补给量；调研地下水埋深发现，河道水位高于当地河道两岸的地下水位，故存在河水补给地下水的现象；濮阳市拥有渠村、南小堤等大中型灌区，这些灌区主要是引黄灌区和井灌区，由于渠系水位高于地下水位，故农业灌溉水可补给地下水。主要由人工开采量和潜水蒸发量组成地下水排泄量。人工开采量根据近年来的实际开采情况进行统计；研究区北部平原地下水埋深均大于 5 m，潜水蒸发量非常小，所以忽

略不计。南部黄河滩区有一定的蒸发，其潜水蒸发量是根据地下水埋深计算的。对于越流补给、侧向流出等项，由于研究区浅层和深层地下水存在较厚的隔水层，且侧向流出的水力坡度很小，故不作考虑。以平水年为例，计算濮阳市各管理单元的补给量、排泄量和蓄变量，并根据蓄变量推求区域的地下水位平均变幅，然后根据实际观测水位进行验证（表 1）。



图 2 濮阳市水文管理单元分区

Fig.2 Hydrologic control unit division of Puyang

表 1 濮阳市平水年地下水均衡计算结果

Table 1 The calculation results of groundwater equilibrium in Puyang

管理单元	补给量/10 ⁴ m ³				小计	排泄量/10 ⁴ m ³			蓄变量/ 10 ⁴ m ³	地下水位	
	降水 补给量	河道 补给量	灌溉 补给量	井灌 回归量		地下水 开采量	潜水 蒸发量	小计		变幅/m	误差/%
黄河内滩 I 区	3 423	3 553	2 098	138	9 212	2 052	6 985	9 037	185	0.10	2.11
黄河内滩 II 区	1 899	1 667	189	67	3 823	1 139	3 278	4 417	-44	-0.05	3.09
金堤河天然文岩渠 I 区	3 180	1 379	1 218	207	5 984	3 543	2 497	6 040	-169	-0.14	2.07
金堤河天然文岩渠 II 区	8 675	7 008	3 085	171	18 940	5 516	8 861	14 377	1 568	0.25	10.60
金堤河天然文岩渠 III 区	1 949	3 708	505	245	6 407	3 610	2 150	5 760	-60	-0.06	9.84
徒骇马颊河 I 区	14 476	0	6 757	6 559	27 793	29 910	0	29 910	-1 533	-0.28	-10.16
徒骇马颊河 II 区	5 332	0	2 631	1 448	9 411	7 910	0	7 910	-242	-0.12	-15.75
章卫河平原	2 412	0	685	663	3 761	4 444	0	4 444	-415	-0.35	-7.78
合计	41 346	17 315	17 168	9 498	85 331	58 124	23 771	81 895	-710		

同理，得到丰水年、枯水年各管理单元的地下水蓄变量和地下水位变幅。选取规划水平年为 2030 年，根据未来地下水开采量目标代入相关计算式，进一步求出在不同水文条件下地下水位变幅 $\Delta H_{丰}$ 、 $\Delta H_{平}$ 和 $\Delta H_{枯}$ ，即为濮阳市各管理单元的地下水管理控制水位阈值（表 2）。由表 2 可知，濮阳市地下水位在丰水年会上升 0.20~1.66 m，考虑到丰水年大量的地下水补给和地下水开采压力，故这种回升的结果是合理的；枯水年各地下水位管理单元水位变化趋势不同，水位变幅为-0.25~0.29 m。其中，金堤河天然文岩渠 I 区、徒骇马颊河 I 区和 II 区、章卫河平原由于目前已处于地下水过度开采状态，所以其地下水位在规划年恢复较少；金堤河天然文岩渠 II 区和 III 区由于地下水开采程度低、补给条件好，故到规划水平年时地下水位回升幅度相对较大；而对于地下水埋深较浅的黄河内滩 I 区和 II 区，其地下水位基本保持稳定。

表 2 基于地下水均衡法的管理控制水位阈值

Table 2 Management and control water level threshold based on the equalization method

管理单元	代表性监测井号	地下水位变幅/m		
		枯水年	平水年	丰水年
黄河内滩 I 区	濮阳县 09#	-0.1	0.1	0.2
黄河内滩 II 区	台前 07#, 12#	-0.15	-0.05	0.34
金堤河天然文岩渠 I 区	濮阳县 02#, 23#, 27#	0.01	0.12	0.46
金堤河天然文岩渠 II 区	濮阳县 12#, 14#, 19#; 范县 06#, 12#, 15#	-0.07	0.31	1.02
金堤河天然文岩渠 III 区	台前 03#, 12#	0.29	0.35	1.66
徒骇马颊河 I 区	清丰 14#, 34#, 35#, 36#; 南乐 03#, 14#, 16#, 17#, 19#, 20#	0.09	0.26	0.7
徒骇马颊河 II 区	濮阳 01#, 25#	0.15	0.38	0.6
章卫河平原	清丰 24#, 28#	-0.25	-0.1	0.75

3.2 疏干体积法的管理控制水位划定结果

濮阳市地形相对一致，以冲积扇平原为主，且含水层平均厚度较均匀，所以选取疏干体积法来划定地下水管理控制水位。以县级行政区为划分标准，把濮阳市划分为 6 个县级管理单元，分别是华龙区、濮

阳县、范县、台前县、清丰县和南乐县。

疏干体积法划定地下水管理控制水位的关键在于地下水开采量压减指标和初始平均水位的确定。濮阳市到规划水平年 2030 年的地下水开采量压减指标为 5 962 万 m³。在设定各管理单元的初始平均水位时,要兼顾考虑水位监测数据的时间序列、数据准确性、数据完整性、水文地质条件、地下水开发和利用情况等因素,从现有 80 多眼监测井中选取了 29 眼代表性监测井,并选择这些代表性监测井在丰水年 ($P=25%$)、平水年 ($P=50%$)、枯水年 ($P=75%$) 下的地下水位观测值,按地下水位观测数据选取现状年 2015 年,以此作为初始水位。根据相关计算式求得各管理单元在规划水平年 2030 年的地下水管理控制水位变幅(表 3)。

表 3 基于疏干体积法的 GMCWL 阈值

Table 3 Management and control water level threshold based on drainage volume method

管理单元	地下水开采量 压减指标/10 ⁴ m ³	规划水平年地下水位变幅/m		
		枯水年	平水年	丰水年
华龙区	931	0.62	0.75	0.89
濮阳县	580	0.07	0.08	0.10
范县	81	0.02	0.03	0.04
台前县	339	0.15	0.18	0.22
清丰县	2 269	0.45	0.54	0.65
南乐县	1 762	0.50	0.60	0.71

划定结果表明,在地下水超采区濮阳市区、清丰县和南乐县境内,预测地下水开采量将大幅减少,地下水位将会上升 0.45~0.89 m,上升幅度是合理的,故划定结果合理。由于濮阳县、范县、台前县一般地

下水埋深在 5 m 以内,浅层地下水无超采现象,所以到规划水平年基本稳定在当前水位。

3.3 时间序列法的管理控制水位划定结果

利用时间序列法对濮阳市代表性监测井的地下水位序列进行拟合,濮阳市 01#、濮阳县 14#、清丰县 28#和南乐县 19#的拟合结果如图 3 所示。由表 4 的后验差法检验结果可知,时间序列法建立的模型对该区域地下水动态预测的精度较高,4 个代表性监测站点的预测等级均是好、良,说明在短时期开采方式变化不大的前提下,可采用此方法进行地下水位变化的中短期预报。

表 4 后验差法检验结果

Table 4 Results of post test

代表性监测井	P	C	预报等级
濮阳市 01#	0.98	0.32	好
濮阳县 14#	0.92	0.38	良
清丰县 28#	0.97	0.33	好
南乐县 17#	0.96	0.32	好

由时间序列法的预报结果可知,未来濮阳市超采区的地下水位仍会继续下降,非超采区的地下水位保持基本稳定。例如,位于超采区内的监测井濮阳 01#、清丰县 28#、南乐县 19#,地下水位均有一定程度的下降趋势,到 2030 年下降至 26.76~27.21 m (濮阳 01#)、27.99~28.89 m (清丰县 28#)、31.51~32.23 m (南乐县 19#);而位于非超采区的监测井濮阳县 14,到 2030 年地下水位维持在 51.78~53.20 m,故将该地下水位变幅设定为该井的管理控制水位阈值。

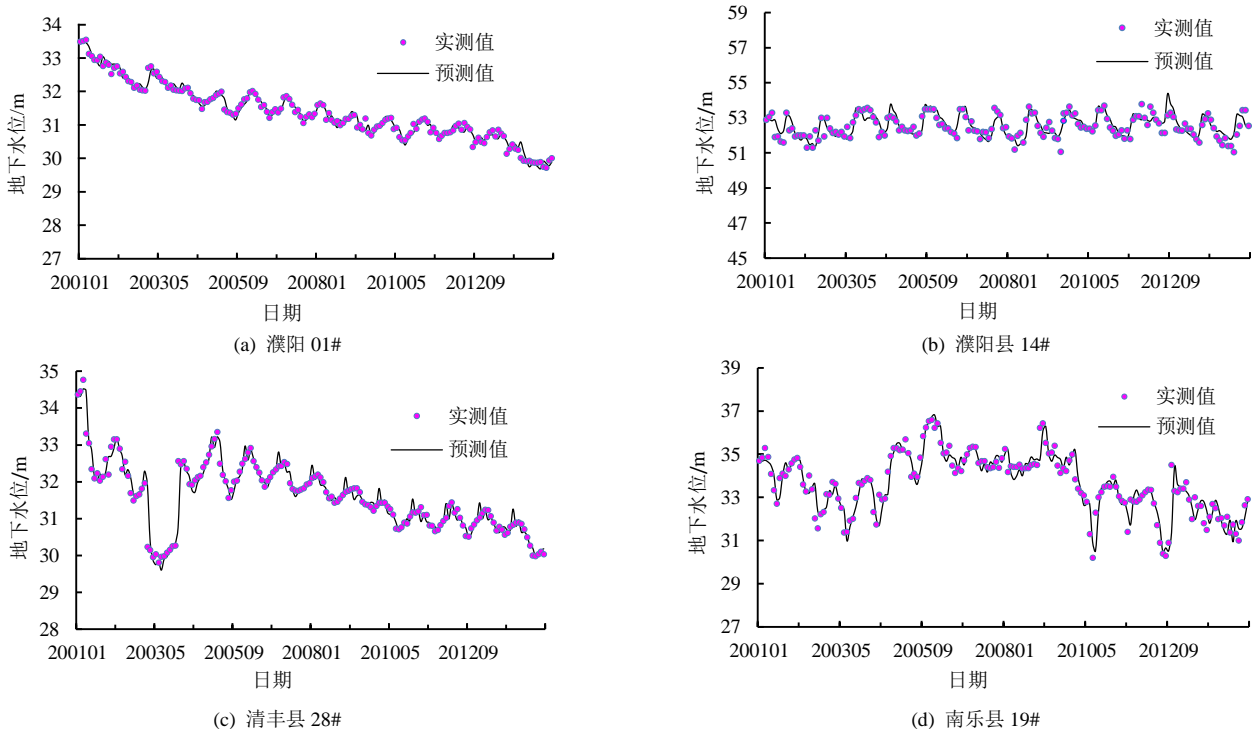


图 3 濮阳市代表监测井时间序列拟合结果

Fig.3 The fitting results of representative monitoring wells time series in Puyang

3.4 3种改进方法管理控制水位划定结果对比

将3种方法得到的各代表性监测井管理控制水位的结果进行比较,如表5所示。

表5 3种方法的GMCWL划定结果比较

Table 5 Comparison of GMCWL delimitation results under three methods

代表性 监测井	初始 水位/m	管理控制水位/m		
		时间序列法	疏干体积法	地下水均衡法
濮阳 01#	29.88	28.66~29.25	30.50~30.77	30.03~30.48
濮阳县 14#	52.36	51.78~53.20	52.51~52.58	52.29~53.38
范县 12#	45.43	45.44~46.48	45.45~45.47	45.36~46.45
台前县 07#	44.28	43.31~44.11	42.98~43.05	43.12~44.49
清丰县 28#	30.40	27.99~28.89	30.85~31.05	30.15~31.15
南乐县 19#	31.97	31.51~32.23	32.47~32.68	32.06~32.67

从表5可知,在丰水年条件下,濮阳市地下水位到规划水平年整体呈升高趋势,特别是在华龙区(濮阳 01#)、清丰县(清丰县 28#)、南乐县(南乐县 19#)等地下水超采区水位会有较大幅度回升。当典型年处于平水年和枯水年时,若采用改进地下水均衡法进行划定,那么有些管理单元水位将表现出不同程度的下降趋势,这是因为该方法考虑了地下水补给与排泄过程对地下水位变化的影响;而采用改进疏干体积法划定时,所有管理单元水位均有不同程度的升高趋势,这是因为该方法是将地下水开采总量压减指标分摊到整个区域来计算地下水位平均变幅,再根据变幅去划定管理控制水位。总体来看,如果用县级行政区划分基本单元,上述2种方法的划定结果基本一致,但由于改进疏干体积法未考虑水文地质条件差异的影响,所以当区域地下水位变幅细化到典型监测井时,与改进地下水均衡法相比地下水位变幅差别较大。例如,濮阳县在采用改进疏干体积法划定控制水位时结果比较平均,各行政区的地下水位变幅在0.07~0.10 m之间;采用改进水均衡法划定时,依据水文地质条件的差异将行政区分为黄河内滩I区、金堤河天然文岩渠I区和II区,在此基础上再划定各管理单元的地下水位变幅分别为0.01~0.46、-0.07~1.02、-0.1~0.2 m,所以改进地下水均衡法与改进疏干体积法结果差别较大。而时间序列法得到的是代表性监测井的管理控制水位,其水位结果比前2种改进方法更清楚直接。以濮阳县、范县和台前县为例,由于其地下水位至规划水平年的变化很小,所以时间序列法与前2种改进方法的划定结果比较一致;然而当研究区域是压采程度较高的华龙区、南乐县和清丰县时,时间序列法预测结果显示在未来一段时期,这些地区地下水位仍将呈一定的下降趋势,这与改进地下水均衡法和改进疏干体积法的预测结果不一致,所以时间序列法更加适合在地下水开发利用方式不发生较大变化的区域使用。

4 讨论

地下水均衡法和疏干体积法的理论基础是水量平衡原理,是前人^[14,21]使用推算平原浅层地下水超采区超采量常用方法。故在划定管理控制水位时,充分考虑了未来不同水资源条件和地下水压采举措下的治理效果,其结果能更合理地反映出在各种作用影响下的地下水位变化趋势。地下水均衡法和疏干体积法得到的是不同管理单元的平均水位变幅,2种方法均能体现管理单元的空间差异性,但需要通过一定的方法进一步将平均水位变幅分解到相应的监测井。

清丰县和南乐县由于农业灌溉大量开采浅层地下水,同时远离黄河地下水补给条件弱,故地下水位呈下降趋势;在未来一段时间内,如果没有合适的水源置换条件和有力的地下水压采举措,地下水持续开采将进一步加剧其水位下降趋势,预测至2030年水位会下降1~1.5 m(清丰 28#和南乐 19#)。华龙区是濮阳市主城区,地下水又是市区供水的主要水源,开采集中且开采量较大,如持续开采至2030年地下水位降幅可达2~3 m(濮阳 01#),但2018年濮阳市区供水改为南水北调水源后,地下水开采量已得到相应的控制,这与预测结果不太一致。范县、台前县和濮阳县由于邻近黄河,受侧向补给作用其地下水一直处于采补动态平衡之中,故地下水位变化趋势比较平稳。总体来看,根据时间序列法预测结果,未来濮阳市北部超采区内地下水位会呈一定程度的下降趋势,而南部非超采区的地下水位保持稳定。但该结论是在人为干预强度较低的前提下得到的,随着南水北调工程逐步发挥效益,对濮阳市超采区的地下水位变化产生显著影响,这也导致不同方法的预测结果差别较大。

总体来说,平原区浅层地下水受地形地貌、降水、地表水补给以及人类开采活动等影响,呈动态变化幅度大的特点。地下水埋深增加会引起当地各种生态环境问题,因此应加强平原区浅层地下水管理控制水位的内涵解读、普适划定方法的研究,剖析有效监督管控地下水位及影响地下水位控制阈值确定的主导因素。为了能够根据区域地下水开发利用现状和今后社会发展用水需要,更好地管理与保护地下水,满足未来一定管理目标下的地下水位控制阈值提供保障。

5 结论

1) 疏干体积法的各管理单元只对行政区划县级管理单元进行了考虑分析,没有综合考虑水文地质条件的影响,在管理单元的平均地下水位具体到有代表性的监测井时,划定结果在分解到代表性监测井时与地下水均衡法相比水位变幅差别较大。

2) 对于地下水开采不易管理控制的地区使用时间序列法对地下水位进行预测,而对于地下水压采强度较大的地区,其结果偏差较大;当具体到某个典型监测井时,地下水均衡法与疏干体积法计算结果水位变幅差别较大。

3) 地下水均衡法综合考虑了地下水开发利用现状、水文地质条件和地下水管控对策的影响,划定结果更符合实际。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 陈飞,于丽丽,侯杰,等.地下水管理立法分析与制度研究[J].人民黄河,2018,40(1):46-49.
CHEN Fei, YU Lili, HOU Jie, et al. Analysis of the groundwater management legislation and studies on the groundwater management system[J]. Yellow River, 2018, 40(1): 46-49.
- [2] 童学卫,李伟,周明亮,等.地下水管理对策初探[J].中国水利,2015(3):21-24.
TONG Xuewei, LI Wei, ZHOU Mingliang, et al. Countermeasures of groundwater management[J]. China Water Resources, 2015(3): 21-24.
- [3] 窦明,张彦,赵辉,等.我国地下水管理与保护制度体系的构建[J].人民黄河,2015,37(3):49-53,57.
DOU Ming, ZHANG Yan, ZHAO Hui, et al. Building of groundwater management and protection institutional system in China[J]. Yellow River, 2015, 37(3): 49-53, 57.
- [4] 王浩.实行最严格水资源管理制度关键技术支撑探析[J].中国水利,2011(6):28-29,32.
WANG Hao. Analysis of key technical support for implementing the strictest water resources management system[J]. China Water Resources, 2011(6): 28-29, 32.
- [5] 李海岭,周雨泽,曹亚新,等.基于地下水压采目标的地下水热源系统井群调控方案[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):165-173.
LI Hailing, ZHOU Yuze, CAO Yaxin, et al. Controlling plan of well group operation of groundwater source heat pump system with the target of groundwater pressure recovery[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 165-173.
- [6] 袁长极.地下水临界深度的确定[J].水利学报,1964(3):50-53.
YUAN Changji. Determination of critical depth of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(3): 50-53.
- [7] 郭占荣,刘花台.西北内陆灌区土壤次生盐渍化与地下水动态调控[J].农业环境保护,2002,21(1):45-48.
GUO Zhanrong, LIU Huatai. Secondary salinification of soil and dynamic control of groundwater in irrigation area of inland basin, Northwestern China[J]. Agro-Environmental Protection, 2002, 21(1): 45-48.
- [8] 方樟,谢新民,马喆,等.河南省安阳市平原区地下水控制性管理水位研究[J].水利学报,2014,45(10):1205-1213.
FANG Zhang, XIE Xinmin, MA Zhe, et al. Confirmation of controlled groundwater management level and demonstration study in Anyang City, Henan Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10): 1205-1213.
- [9] 姜晨光,姜平,蔡伟,等.城市地下水位变化与地面沉降关系的监测与分析[J].地下水,2003,25(3):133-135,159.
JIANG Chenguang, JIANG Ping, CAI Wei, et al. Monitoring and analysis on the relation between variation of groundwater table and land subsidence in urban area[J]. Groundwater, 2003, 25(3): 133-135, 159.
- [10] 姜晨光,于雪鹏,蔡伟,等.城市地面沉降与地下水位变化关系的数学模拟[J].中国煤田地质,2004,16(1):29-31.
JIANG Chenguang, YU Xuepeng, CAI Wei, et al. Mathematical simulation of relation between urban land subsidence and water table variation[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(1): 29-31.
- [11] 谢新民,柴福鑫,颜勇,等.地下水控制性关键水位研究初探[J].地下水,2007,29(6):47-50,64.
XIE Xinmin, CHAI Fuxin, YAN Yong, et al. Preliminary study on critical depth of ground water table[J]. Ground Water, 2007, 29(6): 47-50, 64.
- [12] 于璐,窦明,赵辉,等.海水入侵区地下水管理控制水位划定方法研究[J].水电能源科学,2015,33(12):143-147.
YU Lu, DOU Ming, ZHAO Hui, et al. Studying on delimiting method of management-based groundwater controlling level in seawater intrusion region[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 143-147.
- [13] 梅梓腾,康爱卿,郭维维,等.太原盆地地下水水量水位双控研究[J].海河水利,2022(4):5-8,12.
MEI Ziteng, KANG Aiqing, GUO Weiwei, et al. Study on double control of groundwater quantity and level in Taiyuan Basin[J]. Haihe Water Resources, 2022(4): 5-8, 12.
- [14] 牛二伟.长治盆地浅层地下水位动态分析[J].人民黄河,2021,43(5):110-115.
NIU Erwei. Dynamic analysis of shallow groundwater level in Changzhi Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 110-115.
- [15] 蒋咏,黄晓燕,杨桂莲,等.江苏省地下水水位红线控制水平评估方法探讨[J].水文,2017,37(5):43-48.
JIANG Yong, HUANG Xiaoyan, YANG Guilian, et al. Assessment method on red lines of groundwater table control level in Jiangsu Province[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 43-48.
- [16] 窦明,胡浩东,王继华,等.城市水源地深层承压水合理开采水位阈值研究[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(5):60-65.
DOU Ming, HU Haodong, WANG Jihua, et al. Study on rational water level threshold of deep confined water in urban water sources[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(5): 60-65.
- [17] 李忠国,束龙仓,荆艳东.人工神经网络法在确定海水入侵区开采量阈值中的应用[J].东北水利水电,2005,23(4):12-13.
LI Zhongguo, SHU Longcang, JING Yandong. Application of artificial neural network method in determining the threshold of exploitation in seawater intrusion area[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2005, 23(4): 12-13.
- [18] 杨泽元,王文科,黄金廷,等.陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(8):67-74.
YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34(8): 67-74.
- [19] 张惠昌.干旱区地下水生态平衡埋深[J].勘察科学技术,1992(6):9-13.
ZHANG Huichang. The ecological equilibrium embedment depth of groundwater in arid region[J]. Site Investigation Science and Technology, 1992(6): 9-13.
- [20] 孙才志,刘玉兰,杨俊.下辽河平原地下水生态水位与可持续开发调控研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):249-254.
SUN Caizhi, LIU Yulan, YANG Jun. Research on the ecological and sustainable groundwater table regulation in the lower Liaohe River plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(2): 249-254.
- [21] 严聆嘉,何鑫,陆垂裕,等.西辽河平原区地下水埋深变化趋势与超采分析[J].水文,2021,41(6):96-102.
YAN Lingjia, HE Xin, LU Chuiyu, et al. Analysis of the groundwater depth variation and over-exploitation in the West Liaohe plain[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 96-102.

airfoil-shaped measuring flume and a flat gate, with the core functionality implemented using the STC89C51RC microcontroller. The system incorporates essential components such as flow measurement facilities, data processing and communication facilities, as well as power facilities. To assess its performance, extensive hydraulic performance tests were conducted, analyzing the system's behavior under various flow rates and gate openings. **【Result】** The threshold for determining the outflow of the airfoil gate pier was between 0.77 and 0.82. The flow formulae for gate outflow and weir flow were established based on the submergence of the gate at different gate openings. Based on water level and gate opening measured using the ultrasonic sensing technology, an automatic control and communication system was developed using the STC89C51RC microcontroller. The real-time outlet flow was collected by a built-in flow calculation module, and the system was powered by a photovoltaic facility. **【Conclusion】** The proposed automatic flow measurement system using airfoil gate pier is accurate. It has potential for automating flow measurement in small rectangular channels in irrigation districts.

Key words: sluice-flume combination; brake orifice discharge; ultrasonic sensor; automatic flow measurement

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 92 页)

Comparative Study of Methods for Evaluating Shallow Groundwater in Plain Areas

PAN Deng^{1,4}, ZHANG Yanfang^{1,4}, HU Haodong^{2,3}, WANG Han², DOU Ming^{2*}

(1. Henan Provincial Natural Resources Monitoring Institutet, Zhengzhou 450016, China; 2. School of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Ningbo Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 4. Natural Resources Science and Technology Innovation Platform of Henan Province Groundwater Resources Investigation and Monitoring Research, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: 【Objective】 Predicting change in groundwater table in response to natural and anthropogenic influence is a prerequisite in groundwater resource management. This paper compares several methods commonly used in studying groundwater dynamics based on the shallow groundwater exploration in plain areas in central China.

【Method】 The study was based on shallow groundwater resources in Puyang City in Henan province. We analyzed the groundwater dynamics in the region using three methods: water balance method, dewatering-volume method, and time series method. **【Result】** The time series method is applicable only to areas where groundwater development and utilization do not show considerable change with time. In contrast, the water balance method and dewatering volume method are more mechanistic, providing more accurate results as they consider potential changes in groundwater usage and management. As the dewatering volume method divides the studied region into subunits based on administrative regions rather than hydrogeological conditions, it could lead to significant differences when compared to measurements from monitoring boreholes. The water balance method considers factors such as current groundwater development, hydrogeological conditions and groundwater management measures, and it is hence more accurate for analyzing groundwater dynamics. **【Conclusion】** Results calculated by the improved groundwater balance method proposed in this paper are consistent with ground-truth data. It is more reliable for evaluating the response of shallow groundwater table to change in management and usages in plain areas.

Key words: shallow groundwater; management and control water level; water level delimitation method; Puyang

责任编辑: 白芳芳