

城市地下水氮氮环境容量动态计算模型及应用

李桂秋¹, 周雨泽¹, 王继华², 窦明^{1, 3}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省自然资源监测和国土整治院, 郑州 450016; 3. 郑州大学生态与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】地下水资源的过度开发利用以及地下水环境污染问题,对城市的建设与发展形成了制约。本研究旨在明确城市地下水氮氮环境容量的变化情况。【方法】以郑州市市区作为研究对象,在剖析郑州市城市不透水面积时序变化的基础上,结合逐年降雨量、河水位等数据,计算城市地下水系统中降雨入渗与河流侧渗补给量的时序变化,以及2019年年内的地下水氮氮环境容量变化;同时,以氮氮环境容量最大为优化目标,以降水与上游来水为约束条件,综合考量降雨入渗、河流侧渗、地下水开采以及氮氮的迁移机制,计算不同来水条件下规划水平年的地下水氮氮环境容量。【结果】①研究区的环境氮氮容量年内分布基本呈现“下降~上升~下降”的态势。②在无调控措施的情况下,截至2030年年底,氮氮的地下水氮氮环境容量在丰水情景下达到最高值,为1964.5t,相较于2019年增长了5%。【结论】不同调控方案均能够改善研究区的地下水环境,且地下水压采措施相较于污染治理措施成效更为显著。

关键词: 地下水;氮氮环境容量;数值模拟;优选模型

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

现阶段对地下水环境容量的定义主要有三种,第一种认为地下水环境容量是反映地下水综合承受能力的指标体系^[1];第二种认为地下水环境容量是表征地下水自净或纳污的能力^[2];第三种指给定污染点位的最大排污^[3]。作为环境承载力的重要组成部分,地下水环境容量受工农业生产的影响巨大^[4]。近30年来,随着社会经济的快速发展,地下水开采量持续增加,引发了地下水位下降^[5]、水质污染^[6]等问题,人类可利用的地下水资源量不断减少。因此,对地下水环境容量展开计算与分析十分必要。

在过去的几年里开展了大量关于水环境容量的研究^[7-11]。目前用于分析评价地下水环境容量的方法主要包括模型法、数值模拟与数学模型相结合的综合法以及经验公式法。MA Q等^[12]通过构建耦合地下水流、地面沉降和淡水盐碱化的有限元数值模型,评价了地面沉降影响下南通市的地下水环境容量。XING L T等^[13]则通过建立一个包含六个评价指标与十一个约束条件的评价体系,计算了济南泉域的地下水环境容量的动态变化。

QU J等^[14]运用差分进化算法求解包括GDP、粮食产量、人口和COD 4个目标的多目标定量评价模型排放量。建立并采用改进的差分进化算法求解多目标评价模型。罗育池^[15]通过分析污染物在土壤包气带中随下渗水体向下迁移的机理过程,借助数值模型计算了郑州市平原岗区不同岩性和厚度包气带的水环境容量。NEYSIANI SN等^[16]利用 k 均值聚类方法对zayandeh-rood河流域的地表水与地下水环境容量进行了综合的评估。

地下水系统受到人类活动与自然因素的双重影响^[17],然而现有的地下水环境容量计算模型大多将城市范围内的地表统一概化为不透水面,且忽视了城市河床硬化对于河流补给的影响,难以精确刻画城市化影响下地下水环境容量的变化。因此,本文在剖析城市土地利用类型变化的基础上,明确了不透水面影响下的降水入渗以及河床硬化影响下河流侧渗量的变化,构建了基于多因子驱动下的城市地下水系统氮氮环境容量数值模型,计算了研究区浅层地下水氮氮环境容量,并对提升研究区浅层地下水氮氮环境容量的各类调

收稿日期/Received: 2025-5-14

修回日期/Revised: 2025-10-13

基金项目: 郑州大学院士团队科研启动(13432340370);河南省自然科学基金面上项目(242300421224);河南省科技攻关项目(222102320211);国家重点研发计划课题(2024YFC3211301)。

第一作者: 李桂秋(1975-),女,讲师,学士,从事水文学及水资源研究。E-mail:lqq@zzu.edu.cn。

通讯作者: 窦明(1975-),男,教授,博士,从事水资源与水环境研究。E-mail:dou_ming@163.com。

控方案进行了优选评价。

1 研究方法

1.1 研究区概况

郑州市区位于河南省中部,辖区面积 993 km²。郑州市区为温带大陆性气候,四季分明。降水年际变化较大,且年内分布不均。多年平均降水量 520.39 mm,最大降水量 1070.6 mm,最小 372.0 mm。降水多集中在 6~9 月份,占多年平均总降

水量的 55.7%。共有 6 条河流,除黄河与贾鲁河外均为季节性河流。

郑州市区属于伏牛山脉与黄淮海平原的过渡地带,北临黄河,从西南向东北,其地貌由黄土台塬逐步变为黄河漫滩。松散岩类孔隙水是研究区内主要的含水类型,其主要存在于第四系。其中潜水含水层厚度小于 25 m,埋藏深度小于 80 m,由西向东深度逐渐增大,如图 1 所示。

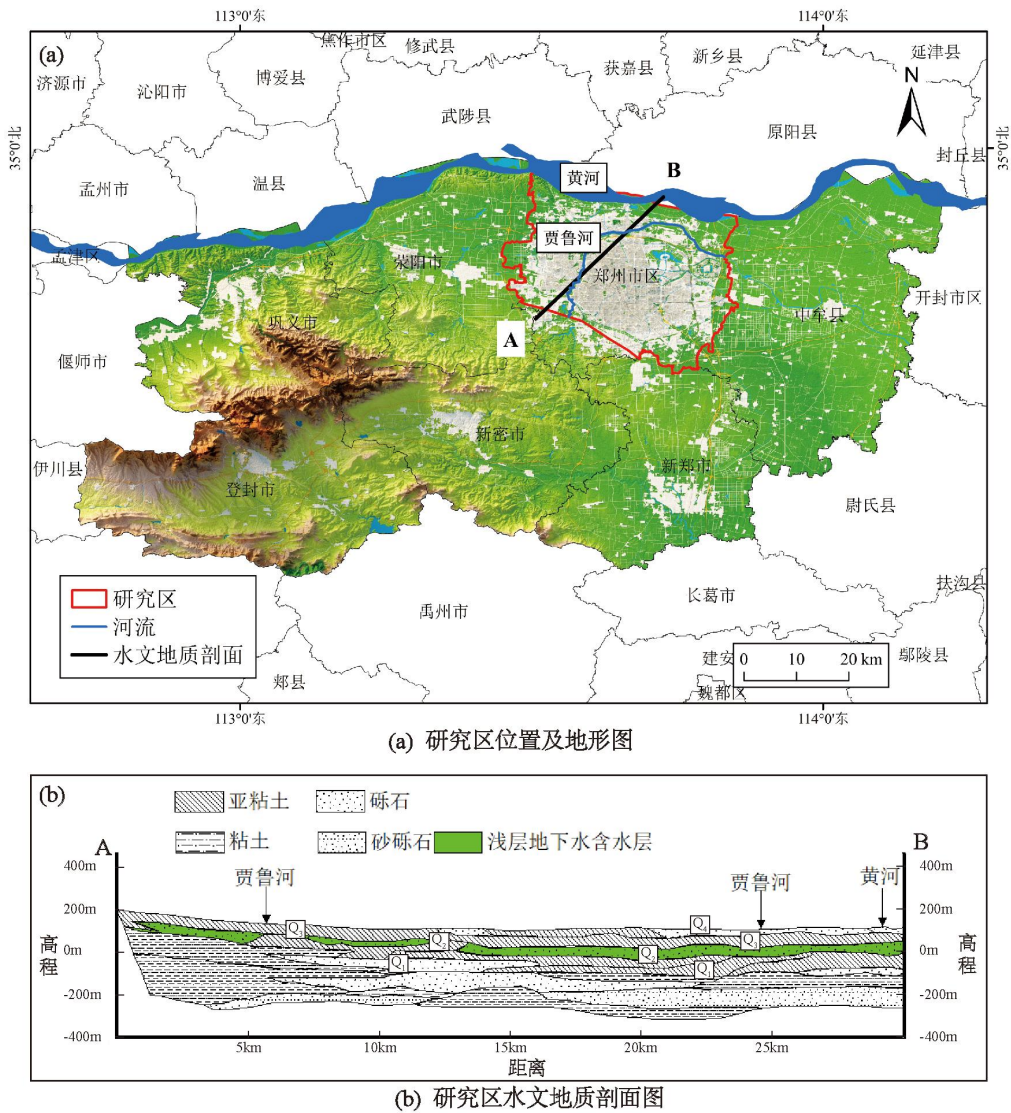


图 1 研究区概况图

Fig.1 Schematic of the study area

资源量发生相应改变。

1.2 城市地下水系统数值模型

地下水环境容量指的是一定时间内,一定范围的地下水系统,在给定的环境目标下所能容纳污染物的最大量^[18]。对于城市而言,随着城市化进程的不断加速,城市土地利用方式不断发生改变,地下水开采量、地下水的侧向补给量以及降水入渗量也在不断变化,进而导致城市的地下水

影响城市地下水资源量的因素主要包括降水入渗、浅层地下水蒸发、河流侧渗补给以及地下水开采等。在综合考虑到降水、河流水位以及地下水开采量对城市地下水的影响下,构建了城市地下水系统数值模型。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) + \varepsilon = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t)|_{t=t_0} = H_0(x, y, z, t), & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) = H_l(x, y, z, t), & (x, y, z) \in B_1 \\ K \frac{\partial H}{\partial n}|_{B_2} = q(x, y, z, t), & (x, y, z) \in B_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为地下水水头, m; K_x, K_y 为水平, 垂直方向渗透系数, m/d; t_0 为初始时间, d; H_0 为含水层初始水头, m; H_l 为渗流区域边界水位, m; q 为含水层二类边界单位面积过水断面补给流量, m/d; ε 为源汇项强度, m/d; Ω 为渗流区域; B_1 为水头已知边界, 第一类边界; B_2 为流量已知边界, 第二类边界; n 为渗流区边界的单位外法线方向。

考虑到城市不透水面的影响, 对于模型中的各源汇项做如下处理:

1) 降水入渗。随着城市化进程的不断加速, 不透水面的分布对于城市降水入渗量的变化影响不断增大。不透水面对降水入渗补给的影响主要体现在不透水斑块重要值、形状、均匀度的变化, 其中不透水斑块重要值对降水入渗补给的影响最大。将不同的不透水斑块重要值代入相应的线性关系式即可求得对应的降水入渗系数, 进而求得实际的降水入渗补给量。具体公式如下所示^[19]:

$$\begin{cases} Q_{prec} = \alpha PF \\ \alpha = -0.1083v + 0.1241 & \text{粘土} \\ \alpha = -0.1329v + 0.1539 & \text{粉土} \\ \alpha = -0.2816v + 0.3143 & \text{砂土} \\ v = \frac{A_{imp}}{F} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为降水入渗系数; Q_{prec} 为降水入渗补给量, $10^3 \cdot \text{m}^3$; P 为年降水量, mm; F 为降水入渗计算面积, km^2 ; v 为不透水斑块重要值; A_{imp} 为不透水面积, km^2 。

2) 潜水蒸发。对于城市而言, 大范围不透水面的存在会阻止地下水通过包气带向大气蒸发。另一方面, 降水入渗补给的减少以及地下水开采量的增加会使地下水位不断下降, 也会使得城市地下水蒸发量减少。因此本研究忽略不透水区域的潜水蒸发排泄量, 仅考虑地下水水位较高的非不透水区域的地下水蒸发量。

3) 河流侧向补给。本次研究对于河流侧渗补给量采用以下公式进行计算。

$$\begin{cases} Q_r = \frac{K_b L_r W_r}{M} (H_r - h) = C_r (H_r - h) & h \geq Y_{bot} \\ Q_r = C_r (H_r - Y_{bot}) & h < Y_{bot} \end{cases}$$

(3)

式中: Q_r 表示河流与地下水的交换量, m^3/d ; K_b 表示河床沉积物渗透系数, m/d; L_r 表示河流长度, m; W_r 表示河流宽度, m; M 表示河床厚度, m; H_r 表示河水位, m; h 表示地下水位, m; C_r 表示河流与含水层的水力传导系数, m^2/d ; Y_{bot} 表示河床底面高程, m。

在城市化进程中, 为了满足河流生态基流需求, 维持河流基本形态和功能, 会对两岸河床进行衬砌以减少侧渗量。河床衬砌对河流侧渗量的影响因素主要包括衬砌材质与渗透时间。常见的衬砌材质为水泥土, 其中水泥的掺量通常在 10%~30%, 是影响河流侧渗的主要因素。渗透时间的变化也会对河流侧渗产生影响, 随着时间的增加, 河流的侧渗系数逐渐减小, 基本于 20~80 h 后趋于稳定状态。由于时间变化对河流侧渗的影响持续时间较短, 本次研究仅考虑衬砌材质中水泥掺量对河流侧渗的影响。根据薛少欣^[20]等人的室内土柱实验, 水泥掺量百分比影响下的河床沉积物渗透系数变化关系如下所示:

$$K_b = 16.398 p^{-0.848} \cdot t^{-2.478} \cdot 3n^{0.606} \quad (4)$$

式中: t 为入渗时间, h; p 为水泥掺量百分比。

1.3 城市地下水氨氮环境容量模型

本次研究以浅层地下水含水层为计算对象, 利用规则网格对计算区域进行剖分, 以各网格为计算单元。作为潜水含水层, 各单元均为混合良好的地下水含水单元。区域整体的氨氮环境容量等于所有单元的容量之和, 计算公式如下:

$$Q_{total} = Q_d + Q_p + Q_t = \frac{10^{-3}}{T} \sum_{i=1}^n (C_s^i - C_0^i) V_i + \sum_{i=1}^n K_i C_s^i V_i + \sum_{i=1}^n C_s^i P_i + C_s q_{out} \quad (5)$$

)

式中: Q_{total} 代表区域总氨氮环境容量, t/d; Q_d 、 Q_p 、 Q_t 分别代表稀释氨氮环境容量、自净氨氮容量以及迁移量, t/d; T 为定义的时期, d; i 为计算区内的计算序号, n 为计算单元总数, C_s^i 为第 i 个单元目标污染物的给定浓度, mg/L; C_0^i 为第 i 个单元目标污染物的初始浓度, mg/L; V_i 为第 i 个单元的地下水体积, m^3 ; K_i 为第 i 个单元目标污染物的降解速率常数, d^{-1} ; P_i 为第 i 个单元的

地下水开采量, m^3 , q_{out} 为流出本单元的地下水流量, m^3/d ; C_s 为流出量所在单元的污染物标准值, mg/L 。

考虑弥散、对流、吸附以及生物降解等作用, 污染物运移的数学模型可概化为^[21]:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (6)$$

式中: θ 为孔隙度; C_k 为溶质 k 的浓度, mg/L ; t 为时间, d ; x_i, x_j 为直角坐标系下沿各方向上的距离, m ; D_{ij} 为水动力弥散系数, m^2/d ; v_i 为渗流速度, m/d ; q_s 为单位体积含水层, 给出或接受的流体数量, 代表源汇项, s^{-1} ; C_s^k 为源汇项中 k 的浓度, mg/L ; $\sum R_n$ 为化学反应项, mg/L 。

数学模型可概化为:

$$\begin{cases} \alpha_L = 0.1L \\ \alpha_T = 0.83(\log L)^{2.414} \\ \lg Q_0 = \lg K_f + \frac{1}{n} \lg C_e \\ \frac{\partial C_{NH_4^+}}{\partial t} = -K_N^{\max} \frac{C_{NH_4^+}}{K_{NH_4^+} + C_{NH_4^+}} \frac{C_{ox}}{K_{ox} + C_{ox}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: α_L 为纵向弥散系数; α_T 为横向弥散系数; L 为水流通长度, m ; K_f 为吸附平衡常数; C_e 为氨氮离子在水中的平衡浓度, mg/L ; Q_0 为吸附剂的平衡吸附量, mg/g ; n 为特征常数; $K_N^{\max}$ 为最大硝化速率常数; $C_{NH_4^+}$ 为氨氮离子的浓度, mg/L ; C_{ox} 为氧浓度, mg/L ; $K_{NH_4^+}$ 与 K_{ox} 为半饱和常数。

本次研究构建的地下水氨氮环境容量模型的具体结构流程如图 2 所示。

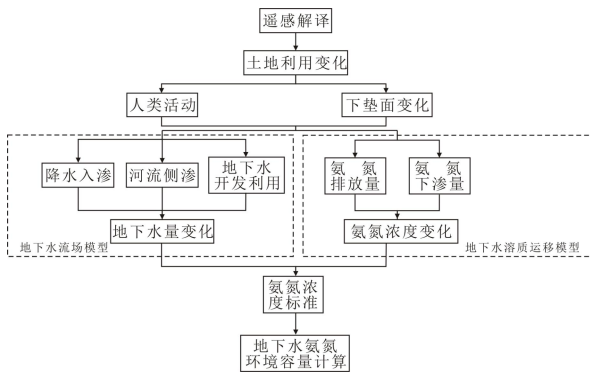


图 2 模型结构框图

Fig.2 Model structure diagram

1.4 城市地下水氨氮环境容量调控方案优选评价

对于城市而言, 源汇项的约束主要体现在浅层地下水可开采量、城市未来建设规划等; 目标

污染物浓度的约束主要体现在不同水功能区的地下水质量标准等。因此, 本次研究以上述影响因子作为约束条件, 以研究区各计算单元的地下水氨氮环境容量之和最大为优选目标, 对不同的地下水环境治理方案进行优选。各优化方案的约束条件为:

$$\begin{cases} \max Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_i \\ W \leq W_0 \\ C_s \leq C_t \\ A_{imp} \geq A_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_i 为每个计算单元的氨氮总环境容量, t ; W 为地下水开采量, $10^4 \times \text{m}^3$; W_0 为地下水可开采量, $10^4 \times \text{m}^3$; C_t 为《地下水环境质量标准》中氨氮的水质标准, mg/L ; A_0 为相关城市发展规划中的城市不透水面积规划目标, km^2 。

根据研究区浅层地下水可开采量, 设定了地下水压采强度; 根据研究区未来的污染治理措施, 设定了河流污染治理强度; 根据研究区未来的城市规划方案, 改变下垫面降水渗透系数的城市雨洪管理优化措施作为调控方案, 评价不同强度下各方案的调控力度。具体方案设置如表 1 所示。

表 1 研究区调控方案设定

Tab.1 Setting of Control Scheme in study area

调控方案	调控方案		
	地下水压采强度	污染治理强度	城市雨洪管理措施优化强度
方案一	20%	10%	
方案二	40%	20%	
方案三		10%	5%
方案四		20%	10%
方案五	20%		5%
方案六	40%		10%
方案七	20%	10%	5%
方案八	40%	20%	10%

2 结果与讨论

2.1 城市土地利用变化分析

中国年度土地覆盖数据集(CLCD)^[22]基于目标年份内所有可用的 30 m 分辨率 Landsat SR 数据, 采用连续变化检测分析了全球精细土地覆盖动态。本次研究以 CLCD 中 2010~2019 年的土地利用覆盖信息为基础(图 3), 分析了研究区 2010~2019 年土地利用的变化。

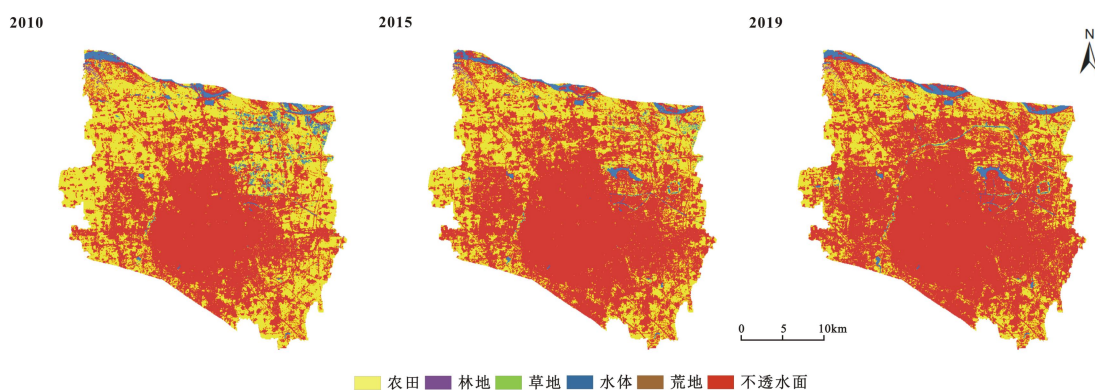


图3 2010~2019年郑州市土地利用变化图
Fig.3 Land use change in Zhengzhou from 2000 to 2019

图3展示了2010年到2019年的土地利用变化。2010~2019年10年的时间内,郑州市不透水面面积从486.46 km²增加到638.99 km²,整体呈上升趋势。郑州市不透水面的扩张方向主要为东部与北部的平原区。截至2019年,研究区土地利用变化最大的为不透水面面积。2010年不透水

面积仅为486.46 km²,到2019年猛增至638.99 km²,约是2010年的1.31倍,有98.91%的原城镇面积未变化。在增加的152.53 km²城镇面积中主要是田地和水面面积,分别占增加总面积的23.38%和1.25%。

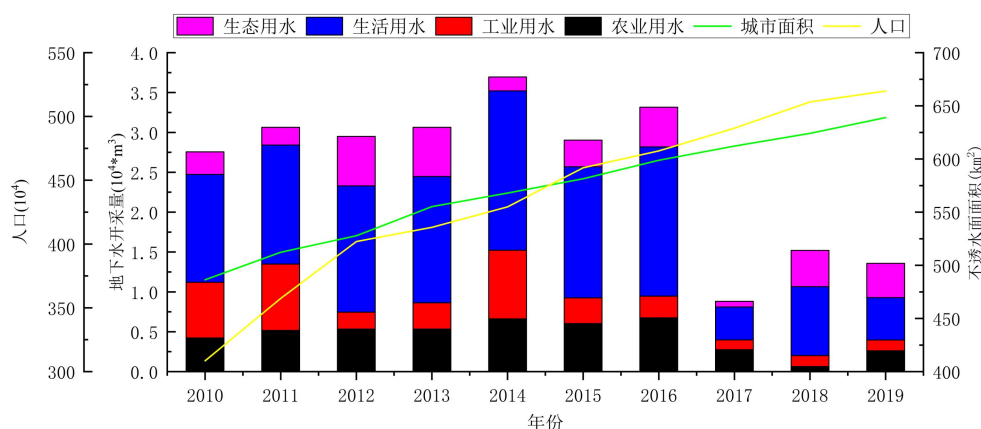


图4 地下水开发利用变化图(2010~2019年)
Fig.4 Urban groundwater development (2000~2019)

结合郑州市地下水开发利用数据可以看出(图4),研究区地下水开采量在2016年之前基本维持在一个较高的水平,同时随着城市化的发展,城市人口不断增长,居民生活用水的占比也不断提升,是研究区地下水开发利用的主要方式。2016年以后,随着地下水超采治理工作的全面展开,大部分生活与工业用水的取水水源转为地表水源^[23],地下水开采量明显下降。另一方面,城市面积的扩大使得农田面积缩小,农田灌溉的用水量也明显下降。

2.2 城市地下水氨氮环境容量模型

2.2.1 地下水流场概化

本次研究以郑州市市区浅层地下水为研究对象,将研究区地下水流动系统概化为非均质二维稳定流动系统。对于边界的设定,水平方向上的边界除北部黄河边界为河流边界以外,其余边界概化为定水头边界。同时根据郑州市区的水文地质条件,按照渗透系数与给水度的不同将郑州市区划分为10个水文地质参数分区。

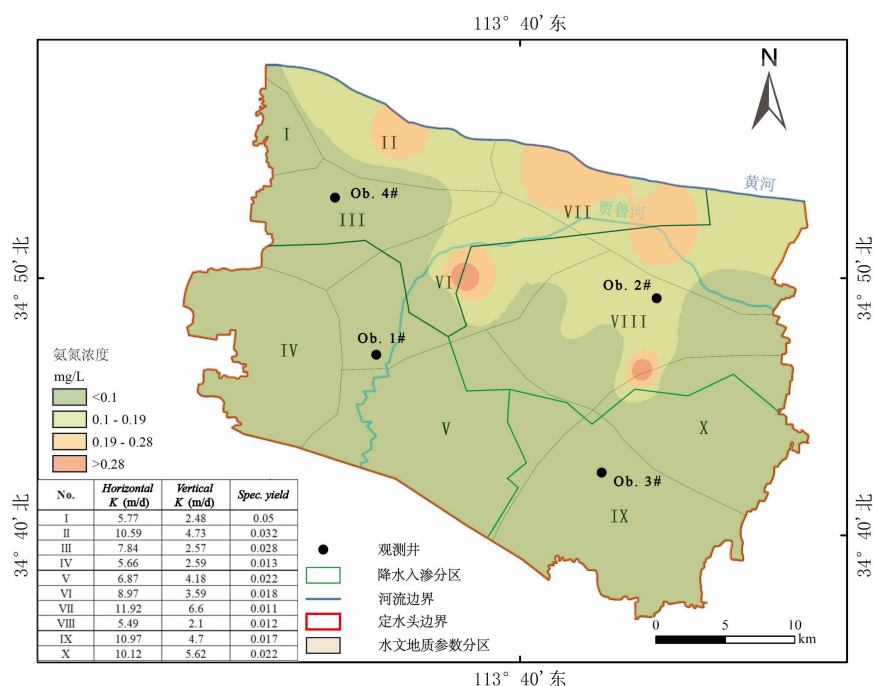


图5 研究区模型概化
Fig.5 Model generalization of the study area

2.2.2 源汇项概化

依据水文地质资料,研究区域透水面的降水入渗系数约处于0.11~0.16之间(图5)。结合土地利用变化数据,通过提取的城市不透水面面积以及降水入渗分区的面积,计算不同时期城市不透水面积的重要值。伴随城市化进程的持续加快,研究区城市不透水面积的重要值从2010年的0.35~0.64提升至2019年的0.5~0.8。运用公式(2)对降水系数进行折算,研究区的实际降水系数则从2010年的0.06~0.08转变为2019年的0.05~0.07。

研究区河流主要包括黄河与贾鲁河,河流水位高于地下水位,常年补给地下水。贾鲁河贯穿郑州市区,大部分河段均有河道衬砌工程建设,其侧向补给系数由公式(4)折算得出。黄河位于模型北部边界,基本没有河道衬砌工程。根据黄河郑州段的水文地质勘探资料,本次对于黄河的河床沉积物渗透系数设定为0.59~0.76 m²/d,由西向东递增;河床沉积物底面高程设定为84.1~90 m,由西向东递减。

人工地下水开采量的数据主要来自郑州市水资源公报,根据开采井的分布情况,以点源开采与面源开采相结合的形式对各区域的开采量进行赋值。

2.2.3 目标污染物及初始条件设定

本研究以氨氮作为目标污染物。通过2019年河流断面的污染物浓度监测数据对模型中两条

河流的氨氮浓度进行赋值,其中黄河的氨氮初始浓度为0.096 mg/L,贾鲁河的氨氮初始浓度为0.32 mg/L。地下水含水层中氨氮的初始浓度按照各监测井2019年的水质监测数据设定为0.02~0.37 mg/L(图5)。采用经验取值法。确定一阶衰减系数为0.003^[24]。

以2019年1月统测水位作为初始水位,基于近60年降水量数据以及近10年黄河来水状况,选取典型年份的河流水位与降水数据。设置连丰、连枯和平水情景,开展为期22年(2019~2030年)的模拟计算,以年为应力期,时间步长以天为单位。

2.2.4 模型验证

采用2019年浅层地下水观测井(图5)逐月长观水位数据以及年末水质数据对模型进行验证。选取Nash效率系数(NSE)对模型的拟合程度进行评价。结果发现,四口观测井水位的NSE在0.70~0.84之间,水质的NSE为0.79,证明该数值模型具有相当高的模拟能力和计算精度,能反映出示范区第四系浅层地下水含水系统的实际特征,可以用于对不同开采情景下研究区地下水氨氮环境容量变化的预测。

2.3 模型结果分析

2.3.1 现状年地下水氨氮环境容量变化

以《地下水环境质量标准》规定的三类水质标准中的氨氮浓度(0.5 mg/L)为目标浓度,对现状年浅层地下水氨氮环境容量进行模拟计算。

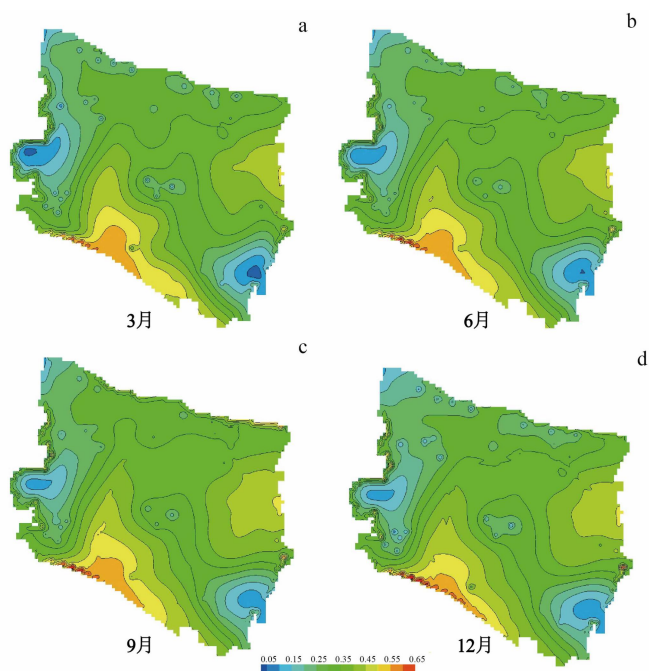


图 6 现状年各季节初期地下水氨氮环境容量等值线图
(a-3 月, b-6 月, c-9 月, d-12 月)

Fig.6 Isoline of groundwater environmental capacity of ammonia nitrogen at the beginning of each season in current year

据研究区 2019 年的氨氮环境容量模拟计算结果(图 6)可以看出,研究区域内氨氮环境容量的分布总体呈现出自南向北渐次递减的态势。其中,南部毗邻岗区的部分区域,因地下水开采强度相对较低,侧向补给条件优越,氨氮环境容量持续维持在较高水平。北部临近黄河区域的傍河取水水源地,开采强度相对较大,但鉴于黄河侧向补给条件良好,除水源地开采井密集区域外,其余区域的氨氮环境容量基本稳定在 0.3~0.4t 之间。在地下水集中开采区域,由于城市需水量较大,开采强度长期处于较高状态,进而形成了部分降落漏斗,该区域的氨氮环境容量始终处于较低水平。

研究区氨氮地下水环境容量呈现出“下降~上升~下降”的趋势(图 7),并在 8 月份达到了年内的峰值(1 872.39 t)。结合降水量与河流水位变化可以看出,地下水氨氮环境容量趋势同降水量与河流水位的变化趋势基本一致。说明随着汛期的来临,研究区地下水系统的降水入渗补给与河流侧渗补给量增加,使得地下水水位上升,地下水资源量增长。同时由于污染物的排放浓度没有明显变化,因此地下水氨氮环境容量较非汛期增长明显。枯水期时,全市地下水开采量较丰水年增加,而降水与河流补给量处于较低水平,最终使得地下水资源量下降,进而导致枯水期的地下水氨氮环境容量低于丰水期。

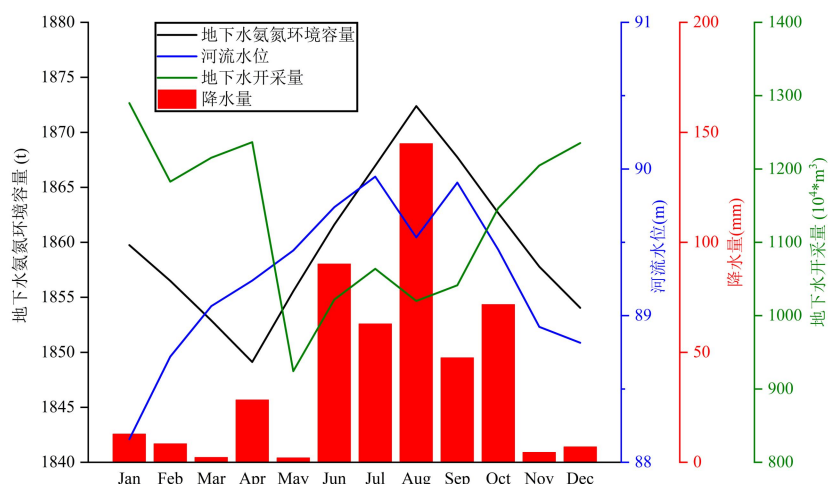


图 7 现状年地下水氨氮环境容量变化趋势

Fig.7 Trend of groundwater environmental capacity of ammonia nitrogen change in current year

2.3.2 源汇项变化分析

根据研究区降水入渗量计算结果(图 8),可以看出研究区降水入渗的补给受降水量与城市面积变化的影响总体呈下降趋势。尤其是 2016 年以后,降水入渗量的变化幅度高于降水量的变化幅度,说明城市面积的变化对降水入渗量的影响进一步提升。

研究区地表径流主要包括贾鲁河与黄河。可以看出研究区地表径流侧渗补给量整体呈下降趋势,主要受降水量变化的影响,但是 2016 年以后同降水量的相关性减弱。说明城市化进程中,城市河道的衬砌工作全面展开,使得河床的渗透系数降低,河流侧渗补给量不断降低。

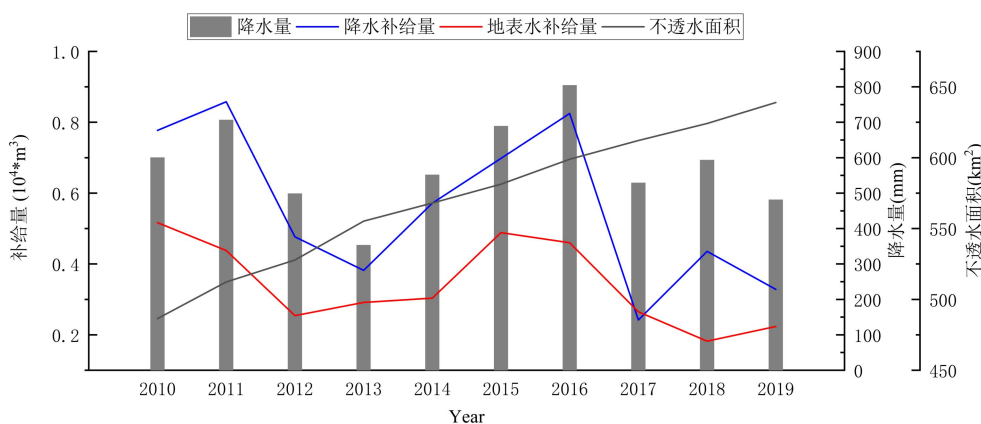


图 8 地下水源汇项变化图(2010~2019 年)

Fig.8 Variation trend of groundwater source sink items (2010~2019)

2.3.3 地下水氨氮环境容量影响因素敏感度分析

通过对影响氨氮环境容量变化的参数进行 20%变幅的调整,计算不同条件下氨氮环境容量的变化,以确定各因素对研究区地下水氨氮环境容量变化的影响大小。具体结果见表 2。

根据敏感度计算结果可以看出,对研究区地下水氨氮环境容量影响较大的是地下水开采量与降水入渗系数的变化,蒸发量的变化对研究区地下水氨氮环境容量影响较小。说明研究区地下水

资源量的变化对氨氮环境容量的影响较大,这可能是因为研究区氨氮初始浓度较低的原因。同时由于研究区蒸发极限埋深为五米,而地下水埋深普遍大于五米,因此蒸发量的变化对研究区地下水资源量的影响较小。

在城市地下水系统中,地下水开采量不断增大,地下水水位降低,使得地表水与地下水的水力联系降低。地表水的过度开发利用使得河流水位降低,同时城市河床衬砌会影响河流侧渗补给系数,最终影响河流对地下水的侧渗补给量。另

一方面，不透水面积的占比增加，使得降水对地下水的补给量减少。这两者都会使得地下水资源量降低，地下水氨氮环境容量也随之降低。

表 2 影响因素敏感度计算结果

Tab.2 Sensitivity of each influencing factors

影响因素	氨氮环境容量/t	敏感度
降水量	1 939.8	2.6%
开采量	1 968.1	4.1%
污染物浓度	1 907.5	0.9%
蒸发量	1 895.5	0.3%
河流水位	1 915.2	1.3%
降水入渗系数	1 951.8	3.2%

2.3.4 调控方案优选评价

根据设定的调控方案，对研究区 2030 年地下水氨氮环境容量进行计算。

表 3 调控方案设定及地下水氨氮环境容量

Tab.3 Evaluation of the Control Scheme

调控方案	2030 年地下水氨氮环境容量/t		
	丰水情景	平水情景	枯水情景
无调控措施	1 964.5	1 890.5	1 825.2
方案一	2 064.4	1 987.8	1 911.7
方案二	2 159.3	2 082.2	1 984.2
方案三	2 040.9	2 001.8	1 843.0
方案四	2 135.6	2 073.9	1 962.9
方案五	2 120.2	2 015.8	1 932.2
方案六	2 271.1	2 088.8	2 039.6
方案七	2 140.6	2 035.5	1 950.6
方案八	2 311.7	2 128.2	2 076.6

到 2030 年，地下水氨氮环境容量的空间分布仍呈现出由南向北逐渐递减的态势。从表 3 可知，不同调控方案下 2030 年的地下水氨氮环境容量均高于无调控措施情景下 2030 年的氨氮环境容量，这表明研究区未来实施的调控措施均有助于改善研究区的地下水环境。在包含两种治理措施的调控方案(方案一至方案六)中，将地下水压采措施与城市雨洪管理优化措施相结合的调控方案(方案五、方案六)效果最为显著，相较于无调控措施情景下 2030 年的地下水氨氮环境容量分别提高了 8%与 16%。而包含三种治理措施的调控方案(方案七、方案八)在所有调控方案中效果最佳，相较于无调控措施情景下 2030 年的地下水氨氮环境容量分别提升了 9%与 18%。

综合来看，三种治理措施相结合的调控方案成效最为显著，包含地下水压采措施的调控方案整体效果优于其他方案。这表明，对于地下水开采强度较高但当前污染程度较低的区域，采取提升地下水补给量以增加整体地下水资源量的措施，有助于提高当地氨氮的地下水环境容量。同时，治理力度亦是影响调控方案效果的关键因素，随

着调控方案力度的增强，研究区地下水环境改善的程度也会越大。因此，郑州市未来应加强地下水水源置换，按照《四水共治》规划以及《河南省地下水管控指标》的要求对城市非农业地下水开采量进行压减与置换。

3 结论

在剖析土地利用类型变化的前提下，核算了城市地下水系统各源汇项在不同水平年的补给水量与排泄水量，并对郑州市现状年以及不同调控方案下 2030 年的地下水氨氮环境容量开展了模拟计算。研究结果显示，研究区域的氨氮环境容量年内分布基本呈现出“下降~上升~下降”的态势。在无调控措施的情形下，截至 2030 年年末，地下水氨氮环境容量在丰水情景中达到最高值，为 1 964.5 t，相较于 2019 年增长了 5%。不同调控方案均能够优化研究区域的地下水环境。随着调控强度的提升，研究区域地下水环境改善的程度越大。在相同强度条件下，地下水压采措施相较于地表水污染治理措施成效更为显著。

参 考 文 献

- [1] 郭晓东,刘强,张慧荣,等.土壤重金属对地下水的危害评价方法研究:以吉林省珲春盆地为例[J].中国地质,2024,51(4):1243-1251.[GUO X D,Liu Q,Zhang H R,et al.Evaluation method of soil heavy metal harm to groundwater:Taking Huichun basin,Jilin Province as an example[J].Geology in China,2024,51(4):1243-1251.]
- [2] OTTOSEN C F,BJERG P L,STEFFE,et al.Natural attenuation of sulfonamides and metabolites in contaminated groundwater-Review,advantages and challenges of current documentation techniques[J].Water Research,2024,254:17.
- [3] 褚雅君,许萍,王海东,等.基于区域水量-水质的水资源承载力研究[J].中国给水排水,2020,36(3):54-61.[CHU Y J,XU P,WANG H D,et al.Water Resources Carrying Capacity Based on Regional Water Quantity and Quality[J].China Water & Wastewater,2020,36(3):54-61.]
- [4] 陈国兵.淮北市土地地质环境容量计算方法及评价结果研究[J].地下水,2020,42(3):111-112.[CHEN G B.Research on the Calculation Method and Evaluation Results of Soil Geological Environmental Capacity in Huaibei[J].Groundwater,2020,42(3):111-112.]
- [5] RAMOS NF,FOLCH A,FERNÁNDEZ-GARCIA D,et al. Evidence of groundwater vulnerability to climate

- variability and economic growth in coastal Kenya[J].Journal of hydrology.2020,586:124920.
- [6] 马秀梅,张天宇,闫莉.黄河流域(片)重要饮用水水源地抽查问题及对策研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(04):16-20.[MA X M,ZHANG T Y,YAN L.Study on the Problems and Countermeasures of Spot Checking of Important Drinking Water Sources in the Yellow River Basin(Slice)[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2021,42(04):16-20.]
- [7] 赵晶,王涛,毕彦杰,等.水循环与水资源合理配置模型(SWAM) I :模型原理与构建[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(01):10-19.[ZHAO J,WANG T,BI Y J,et al.Simulation Water-cycle and Allocation Model(SWAM), Part I :Model Principle and Construction[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2023,44(01):10-19.]
- [8] 金菊良,王建宇,郭涵,等.基于四元联系数减法集对势的区域水资源承载力评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(05):39-44+91.[JIN J L,WANG J Y,GUO H,et al.Evaluation of Regional Water Resources Carrying Capacity Based on Set Pair Potential of Subtraction of Quaternion Connection Number[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2022,43(05):39-44+91.]
- [9] MA Q,PANG Y,MU R.Water Environmental Capacity Calculation Based on Control of Contamination Zone for Water Environment Functional Zones in Jiangsu Section of Yangtze River,China[J].Water,2021,13(5):587.
- [10] WANG X,LI R,TIAN Y,et al.Watershed-scale water environmental capacity estimation assisted by machine learning[J].Journal of Hydrology,2021,597:126310.
- [11] ZHU K,CHEN L,CHEN S,et al.New framework for managing the water environmental capacity integrating the watershed model and stochastic algorithm.[J].The Science of the total environment,2021,816:151659.
- [12] MA Q,LUO Z,WANG Q.Evaluation of groundwater environmental capacity in Nantong,China.Fresenius Environmental Bulletin[J].2017,26(8):5236-5250.
- [13] XING LT,WU Q,YE CH,YE N.Groundwater environmental capacity and its evaluation index. Environmental monitoring and assessment[J].2010,169:217-227.
- [14] QU J,WANG H,YANG L.Multi-Objective Evaluation Model of Groundwater Carrying Capacity in Irrigation District[C].The 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science.2010.
- [15] 罗育池.地下水环境容量研究—以郑州市平原岗区为例[J].地下水.2010,32(6):36-8.[LUO Y C.Groundwater Environmental Capacity-A Case Study on the Plain and Hummock in Zhengzhou City[J].Groundwater.2010,32(6):36-8.]
- [16] NEYSIANI SN,ROOZBAHANI A,JAVADI S,et al.Water resources assessment of zayandeh-rood river basin using integrated surface water and groundwater footprints and K-means clustering method.Journal of Hydrology[J].2022, 614:128549.
- [17] PATRA,S SAHOO,S MISHRA,et al.Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level[J].Urban Managment.2018,7:70-84.
- [18] 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.郑州大学学报(工学版)[J].2020,41(5):60-65.[DOU M,HU H D,WANG J H,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.]
- [19] 王辉,温伟光,刘晓磊.天津海绵城市建设中包气带蓄渗能力研究[J].勘察科学技术,2020,5:6-12.[Wang H,WEN W G,LIU X L.Study on Seepage Storage Capacity of Vadose Zone in Construction of Sponge City of Tianjin[J].Site Investigation Science and Technology,2020,5:6-12.]
- [20] 薛少欣.永定河砂质河床减渗方案优化研究[D].河北:河北工程大学,2020.[XUE S X.Research on optimization of seepage reduction scheme for sandy riverbed of Yongding River[D].Hebei:Hebei University of Engineering,2020.]
- [21] 周雨泽,董少刚,李铤,等.尾矿库渗滤液对地下水污染的数值模拟研究[J].湖南师范大学自然科学学报 .2019,42(5):10-16.[ZHOU Y Z,DONG S G,LI Y,et al.Numerical Simulations of Tailing Pond Groundwater Pollution[J].Journal of Natural Science of Hunan Normal University.2019,42(5):10-16.]
- [22] WANG Z,SHI X,DOU S,et al.The 30 m land cover dataset for capturing land cover changes induced by ecological restoration from 1990 to 2022 on the Chinese Loess Plateau[J].Science Data.2025,12:252.
- [23] 秦欢欢,黄丽想.人类活动影响下北京市平原区地下水资源变化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(03):60-66+76.[QIN H H,HUANG L

X.Study on the Change of Groundwater Resources in the Plain Area of Beijing under the Influence of Human Activities[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(03):60-66+76.]

[24] 韩燕雪.基于 GMS 的郑州市区地下水数值模拟研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.[HAN Y X.Study on numerical simulation of groundwater in Zhengzhou urban area based on GMS[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2018.]

Calculation model for environmental carrying capacity of ammonia nitrogen in urban groundwater its application

LI Guiqiu¹, ZHOU Yuze¹, WANG Jihua², DOU Ming^{1, 3}

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 The excessive exploitation of groundwater resources and the pollution of groundwater have imposed constraints on the construction and development of cities. This study aims to clarify the changes in the environmental capacity of urban groundwater ammonia nitrogen. **【Methods】** Taking the urban area of Zhengzhou as the research object, the time-series changes in rainfall infiltration and riverbank seepage in the urban groundwater system were calculated based on the analysis of urban impervious surface expansion, combined with annual rainfall and river level data. Meanwhile, using the maximization of ammonia nitrogen environmental capacity as the optimization objective, and considering precipitation and upstream inflow as constraints, the groundwater environmental capacity for both the current situation and the planned target year was calculated by comprehensively accounting for rainfall infiltration, lateral river seepage, groundwater exploitation, and ammonia nitrogen migration.

【Results】 ① The annual distribution of the environmental ammonia nitrogen capacity in the study area basically presents a trend of "decrease - increase - decrease". ② Without regulatory measures, by the end of 2030, the groundwater ammonia nitrogen environmental capacity of ammonia nitrogen reaches the highest value under the floodwater scenario, which is 1,964.5t, an increase of 5% compared to 2019. **【Conclusion】** Different management schemes could improve the groundwater environment in the study area, with groundwater pressure extraction showing greater effectiveness than pollution control measures.

Keywords: Groundwater; Environmental carrying capacity of ammonia nitrogen; Numerical modeling; Optimization model