

吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析

查恩爽, 肖 霄

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

ZHA Enshuang and XIAO Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906060>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

张宇, 任国澄, 杨蕴, 周志芳, 郭生根, 熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195

区域地下水资源承载力评价理论与方法研究

Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China

刘琼, 李瑞敏, 王轶, 高萌萌, 李小磊, 孙超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 173-183



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906060](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906060)

吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析 ——以洮儿河扇形地为例

查恩爽¹, 肖 霄²

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026;
2. 河北地质大学水资源与环境学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 吉林省西部是我国主要粮食产区,但区内农业水利规划管理同时面临潜水资源与生态环境双重风险。近 20 年来,区内曾尝试多种水资源利用模式,但缺少不同模式应用效果的定量化对比。文章建立了不同水资源利用模式,对比分析各模式的水资源与次生盐碱化风险。以洮儿河流域为例,采用神经网络预测 2019—2023 年该地区大气降水和地表水对地下水补给量;通过随机数值模拟预测现状开采、连续干旱、无序开采、地下水库建设、节水灌溉、旱田改水田 6 种情形下,区内潜水水位空间分布特征。以防止次生盐碱化为目标,定义水位埋深上限为 1 m;以含水介质厚度为参考,定义水位埋深下限为 12 m。遴选适合吉林省西部地区地下水资源可持续利用模式。结果显示:无序开采是导致区内水资源枯竭的主要诱因;地下水库建设和旱改水工程有助于潜水资源维护,但长期运行可加剧生态环境风险。节水灌溉(净采强度为 $2.0 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)是降低区内水资源风险和生态环境风险的最佳方式。文章采用的神经网络—随机模拟分析方法成功预测了地下水位变化驱动因子和地下水位中长期变化趋势,为我国干旱半干旱地区潜水资源利用方案制定提供了新方法。

关键词: 地下水资源管理; 风险评价; 盐碱化; 随机模拟; 神经网络; 数值模拟

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0036-08

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

ZHA Enshuang¹, XIAO Xiao²

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China; 2. College of Water Resources and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: The western part of Jilin Province is one of the major agriculture zones in China. It is located in a semi-arid zone with limited and unreliable water resources, and also with serious soil salinization. It is of critical importance to manage the groundwater levels in the unconfined aquifer, considering both the risks of water resources and the ecological problems related to the shallow buried depth of groundwater levels. However, there is still lack of quantitative risk analyses on the current strategies of water use in this area. In this study the recurrent neural network is used to predict the rainfall and river flux from 2019 to 2023, which are then used as the input variables in the stochastic groundwater flow models to predict the spatial distribution of groundwater levels in the unconfined aquifer. The groundwater levels under six scenarios, including the present-day recharge and discharge, drought, chaos extraction, managed aquifer recharge, drip irrigation and paddy farming, are calculated. Following

收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2019-09-03

基金项目: 青海省共和县恰卜恰地区地下热水资源预可行性勘查; 国家自然科学基金项目(41807155)

第一作者: 查恩爽(1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质实验与数值模拟研究。E-mail: zhaenshuang@jlu.edu.cn

通讯作者: 肖霄(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下水数值计算研究。E-mail: 394820949@qq.com

a risk assessment, the drip irrigation with a net extraction rate ranging from 2.0×10^8 to $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ is considered as the best strategy for groundwater resources utilization, which can effectively prevent the water resources in the unconfined aquifer from being over-exploited (with the buried depth of greater than 12 m), and also maintain the depth of groundwater table of greater than 1 m to reduce the risk of soil salinization. Meanwhile, chaos extraction inducing the water resources depletion is the major factor, and both the managed aquifer recharge and paddy farming are helpful in water resources conservation, but may worsen the soil salinization. The methodology employed in this study can be widely used in other arid and semi-arid areas for groundwater resources management.

Keywords: groundwater resource management; risk assessment; soil salinization; stochastic modeling; recurrent neural networks; numerical simulation

吉林省西部地区地处松嫩平原西南部,是我国重要粮食产区。受半干旱大陆性季风气候控制,区内年均降水量约为 390 mm,年内分布不均,主要集中于 5—7 月,春季具有十年九旱的特点。区内灌溉用水主要取自地下潜水及承压含水层^[1-2]。为了满足农业灌溉的需要,戴长雷等^[3]提出通过修建地下水库以丰补欠,实现区内水资源的人工调蓄。然而,吉林省西部地势低缓,地质历史时期潜水水位埋藏较浅,蒸发强烈,加之嫩江将大兴安岭地区大量矿物携带至松嫩平原西南部沉积,导致严重的土壤次生盐碱化^[4]。为了改善土壤质量,区内开始实施旱田改水田工程^[5],即通过大水灌溉压盐的物理治理方式,降低表层土壤含盐量。但旱改水工程的实施,导致地下水位抬升。在停灌期间,受区内强蒸发条件的影响,可能加剧土壤次生盐碱化。综合考虑区内水资源调配及土壤次生盐碱化生态环境问题,吉林省西部地区开始实施节水灌溉^[6]。

近年来,范思雨等^[7]基于 1980—2015 年吉林省西部土地利用数据,论述了吉林省西部地区水田演化趋势以及对应的盐碱土分布范围变化。结果显示,旱改水工程对盐碱土的演化具有区域性的抑制作用,但在工程外围,土壤盐碱化程度呈现加剧的趋势^[8]。杨沁瑜等^[9]基于蚁群模型分析了吉林省西部土地利用安全格局。才源等^[10]分析了西部盐碱土近年空间分布状态。卞建民等^[11-12]系统研究了冻融影响下盐碱土中盐分迁移转化机理;张瑜等^[13-14]对比分析了不同改良剂对盐碱土肥力改善效果。尽管关于吉林省西部土壤次生盐碱化的机理和改良的研究较多,但缺少不同方案实施后的效果预测与对比。

本文同时考虑水资源和土壤生态两方面因素,通过随机模拟的方法,对比分析目前区内典型的水资源利用方案,包括人工调蓄、旱改水工程、节水灌溉等实施 5 年后,潜水资源与生态环境的风险。此次研究

建立的神经网络—随机模拟方法体系,更好地预测地下水位变化驱动因子,并遍历性考虑不同驱动因子影响下地下水中长期变化趋势,为我国干旱半干旱地区地下水资源可持续利用和管理提供了新方法。

1 研究区概况

选取吉林省西部相对独立的水文地质单元洮儿河流域山前倾斜平原作为研究区(图 1),面积为 $1\,960 \text{ km}^2$ 。区内第四系潜水主流向为自西北向东南,含水层厚度小于 50 m,沿地下水流向含水层厚度逐渐减小^[15-16]。含水层上游主要由中粗砂和砂砾石构成,渗透性好;下游由中细砂构成并含黏土夹层,渗透性变差。总体而言,潜水资源较为丰富,5 m 降深条件下单井涌水量可达 $1\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[17-18]。

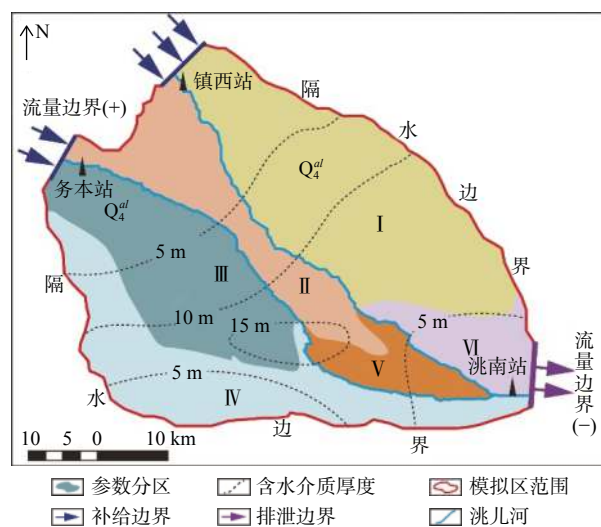


图 1 研究区位置图、边界条件以及参数分区

Fig. 1 Location of the study area, boundary conditions and parameter zonation

区内潜水含水层接受大气降水、河道、灌溉回渗入渗补给以及侧向径流补给。排泄以灌溉开采为主,

伴有蒸发和侧向径流排泄。区内洮儿河上游布设镇西和务本两处水文站,下游布设洮南水文站,记录了近 50 年洮儿河的流量和当地大气降水量。据此估算大气降水入渗量、河道入渗量总和超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2014—2018 年,区内平均农业灌溉用水量约为 $4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,接近大气降水入渗补给量和河道入渗补给量的总和。

2 潜水资源与环境风险等级划分

潜水资源风险根据区内潜水含水介质厚度确定。含水介质厚度是指由潜水含水层隔水底板算起至地表之间的距离,是一个静止变量,代表了地下储水空间。含水介质厚度有别于含水层厚度(隔水底板至潜水面的距离)。研究区内潜水含水介质厚度 1~45 m (图 2)。75% 的区域含水介质厚度小于 12 m, 50% 的区域含水介质厚度小于 5 m。若未来 5 年内潜水位埋深超过 12 m,意味着超过 75% 的区域存在含水层疏干的风险,因此将水位埋深超过 12 m 定义为高资源风险警戒水位埋深(WRII);水位埋深 5~12 m 定义为中度资源风险水位埋深(WRI)。当水位埋深过浅,小于 1 m 时,容易导致次生盐碱化^[19]。因此,当水位埋深处于 1 m 以浅(包括埋深为负值,代表水位高于地表),认为区内潜水存在高环境风险(ERI)。综上,水位埋深 1~5 m 视为低风险,作为该区域潜水资源开发利用的水位控制标准。

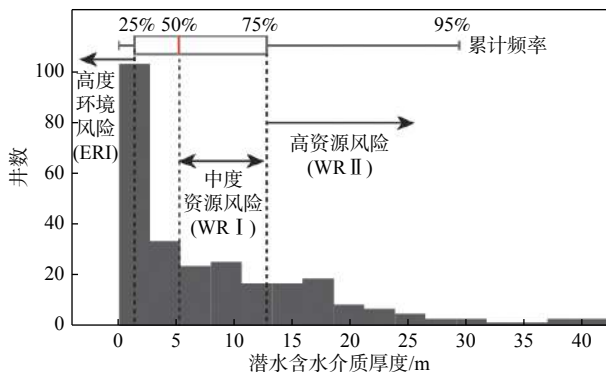


图 2 基于含水介质厚度概率分布的资源风险分级

Fig. 2 Resource risk classification based on probabilistic distribution of aquifer thickness

3 循环神经网络及地下水位变化天然驱动因子预测

河道入渗补给和大气降水入渗补给是该地区潜水含水层水位变化的主要驱动力。基于已掌握的河道入渗量及大气降水入渗量历史时间序列,合理预测

未来 5 年的变化趋势,是准确模拟地下水位动态变化规律的关键。目前关于降水量、入渗量等时间序列数据拓展的方法有很多:统计学方法、物理过程模拟方法以及人工智能神经网络方法等^[19-23]。不同分析方法各有利弊,统计学方法(如回归分析、模糊综合评判、小波分析等)通常要求时间序列统计学关系相对稳定、服从正态分布或均匀分布等特定概率分布,难以处理异常气候变化过程,如干旱或暴雨等。物理过程模拟方法充分考虑降雨等变量的影响因素,如气温、下垫面、大气环流等。理论上该方法是一种准确的模拟方法,但在现实应用过程中,由于气候变量和影响因素过于复杂,难以量化,因此物理过程模拟结果准确度也难以保证。人工智能神经网络方法(如经典的 BP 神经网络)早在 20 世纪 90 年代已被用于气候因子时间序列预测,但由于过度拟合,一度被摒弃。近年来,人工智能算法飞速发展,出现诸多优秀的神经网络结构及训练算法,如卷积神经网络、图神经网络、循环神经网络等。其中,循环神经网络的专长是寻找不同周期历史数据的关联性,并预测数据的未来演化趋势,适合于时间序列的数据处理和信息挖掘。近年来,该方法已成功应用于降水量时间序列预测^[19]。

本文采用循环神经网络方法(RNN, Recurrent Neural Network),基于 1970—2018 年间大气降水量及地表水径流量的实测水文时间序列,分别推测 2019—2023 年大气降水量和地表径流量数值。RNN 计算方程如下^[24]:

$$H_t = \max \{0, W_x X_t + U_y Y_{t-1} + B\} \quad (1)$$

$$Y_t = \max \{0, W_h H_t\} \quad (2)$$

式中: X_t ——输入数据;

Y_t ——输出数据;

H_t ——中间过渡层;

W 、 U 、 B ——权重矩阵。

此次循环神经网络输入和输出层之间设计 3 个隐层。输入层和前两个隐层的输出结果经过 Sigmoid 激活函数处理:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

经过激活函数处理后,可保证输出结果数值介于 0~1 之间,利于不同层位权重的公平、稳定训练。

选择 1970—2010 年水文变量序列作为输入数据,通过式(1)和(2)循环迭代计算确定 2011—2018 年水文变量,并与实测值进行对比,根据计算误差采用 ADAM 算法(Adaptive Moment Estimation Algorithm)^[25]

更新权重矩阵,直到计算值与实测值拟合为止。1970—2010年为神经网络训练阶段,2011—2018年为神经网络权重验证阶段。计算值与实测值的拟合程度采用均方差损失函数表示:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y_t - \tilde{Y}_t)^2 \quad (4)$$

式中: t ——时间, $t=1 \sim 8$ 分别对应 2011—2018 年;

N ——总预测年数, $N=8$;

$\tilde{Y}_t$ ——第 t 年水文变量实测值;

Y_t ——第 t 年水文变量计算值。

确定权重矩阵后,通过式(1)和式(2)预测 2019—2023 年大气降水量及镇西站、务本站和洮南站河流径流量。通过降水入渗系数法,根据大气降水量预测值计算获得大气降水入渗补给量。以镇西站和务本站河流径流量之和作为所选取的水文地质单元上游地表径流汇入量,以洮南站径流量作为下游地表径流流出量,二者之差作为河道入渗对地下水补给量。以年为时间单位用 RNN 计算各水文站径流量。计算河道入渗补给量及大气降水入渗补给量时,忽略水文站之间径流过程的时间滞后性以及大气降水量和地表径流量之间的关联。

RNN 训练阶段,大气降水量计算误差 <5 mm(相对误差 5%),各水文站年径流量计算误差低于 10^4 m³(相对误差 $<1\%$),8 年验证期年降水量计算误差为 3~20 mm(相对误差小于 $<10\%$)、年地表径流量计算误差为 $1\,320 \sim 3.2 \times 10^4$ m³(相对误差小于 $<5\%$)。

由图 3 可知,未来 5 年区内降水量 370~450 mm/a,平均值为 410 mm/a。大气降水入渗系数按 0.23(已扣除蒸发损失)计算,可获得区内未来 5 年大气降水入渗补给量为 $1.5 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^8$ m³/a;而河道入渗补给量波动于 $3.2 \times 10^8 \sim 6.0 \times 10^8$ m³/a。按 2014—2018 年灌溉用水量估计,未来 5 年灌溉用水量(潜水)波动于 $3.8 \times 10^8 \sim 6.9 \times 10^8$ m³/a,灌溉回渗量为 $4.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^8$ m³/a。

4 数值模拟与潜水资源利用方案讨论

潜水水位埋深的预测基于二维多孔介质非稳定水流运动方程^[26]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(h-b) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h-b) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + Q = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

式中: T ——导水系数/(m²·d⁻¹);

h ——潜水水位标高/m;

b ——含水层底板标高/m;

x, y ——空间坐标/m;

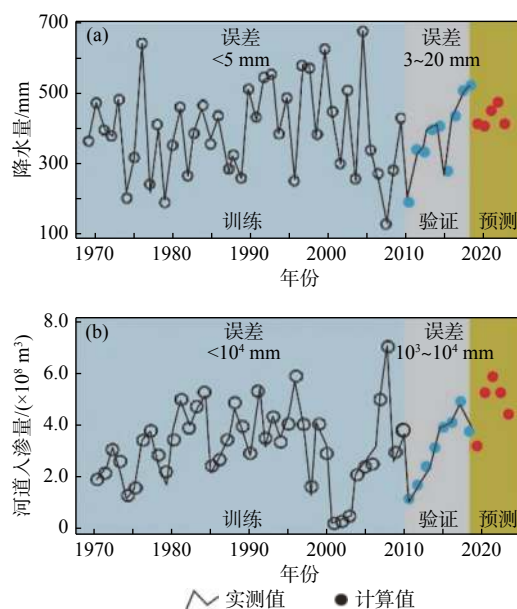


图 3 年降水量和年河道入渗补给量实测值和计算值图

Fig. 3 Average annual rainfall and annual average river infiltration recharge

μ ——给水度;

Q ——单位面积补给量(包括大气降水入渗补给量、河道入渗补给量和灌溉回渗量)或排泄量(开采量和蒸发量)/(m·d⁻¹)。

在研究区进行网格离散后(此次剖分为 10 000 个三角形单元格),应用水流运动方程,采用 FEFLOW 求解^[27]。

根据区内多年地下水位等值线和流场分布,洮儿河流域外围以地下水流线作为隔水边界。上游两处断面为流入边界,下游一处断面为流出边界(图 1)。根据多年平均水力梯度,通过达西定律计算得到地下水侧向流入量约为 $1.0 \times 10^7 \sim 5.0 \times 10^7$ m³/a,侧向流出量约为 $3.0 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^7$ m³/a。

参数分区根据陈社明^[28]对吉林省西部地区数值模型识别和验证结果确定,并结合潜水含水层岩性特征,定义渗透系数和给水度置信区间。由于研究区潜水含水层为山前洪积扇相沉积、下游接续辫状河湖相沉积,因此假设渗透系数和给水度分别服从对数正态分布和正态分布^[29]。不同参数分区,参数取值见表 1^[28]。

模拟首先设置初始水位为 10 m,通过 FEFLOW 模拟 1970—2018 年水头变化,获取 2018 年地下水位空间分布。获得的 2018 年年底的地下水位作为 2019—2023 年水位预测的初始水位。

此次研究对比 6 种不同水资源开发利用模式下(表 2),研究区内地下水位空间分布规律及风险等级。根据 RNN 计算结果和目前研究区内灌溉用水

表 1 不同分区内渗透系数、给水度概率分布^[28]

Table 1 Probability distribution of coefficient of permeability and specific yield in different zones

分区	渗透/(m·d ⁻¹)			给水度		
	均值	方差	概率分布	均值	方差	概率分布
I	30.5	2.3	对数正态	0.13	0.05	正态
II	35.8	1.8	对数正态	0.14	0.04	正态
III	25.7	5.0	对数正态	0.12	0.05	正态
IV	28.3	3.2	对数正态	0.10	0.05	正态
V	20.6	2.2	对数正态	0.10	0.04	正态
VI	23.8	1.7	对数正态	0.10	0.04	正态

状况,确定维持现状条件下,区内补给量未来 5 年为 $4.7 \times 10^8 \sim 8.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 开采量 $3.8 \times 10^8 \sim 6.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 假设二者服从均匀分布,作为此次模拟的情形 1。情形 2 假设干旱条件下,开采量与现状条件相同,但区内补给量由现状条件降低至 $0 \sim 4.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。情形 3 假设区内补给量与现状条件相同,开采量的均值与现状条件相同,均为 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,但由于无序开采导致开采量波动幅度增加一倍,开采量取值 $4.0 \times 10^8 \sim 11.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。情形 4 考虑地下水库调蓄功能,使得区内年均补给量和开采量不变,但以丰补欠,旱季增加开采,雨季降低开采并增加补给;情形 5 在节水灌溉条件下,区内开采量降低至 $2.0 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,对应补给量随着灌溉回渗量减小略有下降;情形 6 是在旱田改水田工程实施条件下,开采量维持不变(灌溉用水主要取自地表水和第四系承压水),区内补给量

表 2 不同工况条件下研究区域补给量与开采量取值范围

Table 2 Ranges of recharge and exploration rate under different scenarios

序号	工况	补给量/ ($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	开采量/ ($\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	概率分布
情形1	维持现状	4.7 ~ 8.0	3.8 ~ 6.9	均匀
情形2	干旱	0.0 ~ 5.0	3.8 ~ 6.9	均匀
情形3	无序开采	4.7 ~ 8.0	4.0 ~ 11.0	均匀
情形4	地下水库调蓄	4.7 ~ 8.0	3.8 ~ 6.9	均匀
情形5	节水灌溉	4.0 ~ 7.0	2.0 ~ 3.0	均匀
情形6	旱改水工程	7.0 ~ 10.0	3.8 ~ 6.9	均匀

增加 50%。

根据表 1 和表 2 中的参数取值范围以及所服从的概率分布,采用蒙特卡洛方法随机选取区域补给量、开采量、渗透系数及给水度。对应不同参数取值,分别进行 100 次水流模拟,确定 5 年后的水位埋深空间分布。取水埋深平均值,进行潜水资源与环境风险分析。如图 4(a) 所示,在维持现状条件下(情形 1),区内地下水位埋深(5 ~ 12 m)普遍存在中度资源风险(WRI),特别是洮儿河下游约 30 km^2 范围内地下水位埋深超过 12 m,存在高资源风险(WRII),现状开采条件可能导致潜水含水层疏干。同时,局部范围潜水水位埋深低于 1 m,存在较高的土壤盐渍化风险(ERI)。在多年干旱条件下(情形 2),研究区内水位埋深普遍增加,存在高潜水资源风险的区域面积较情形 1 条件下增加将近 1 倍(图 4b)。若区内继续无序开采(情形

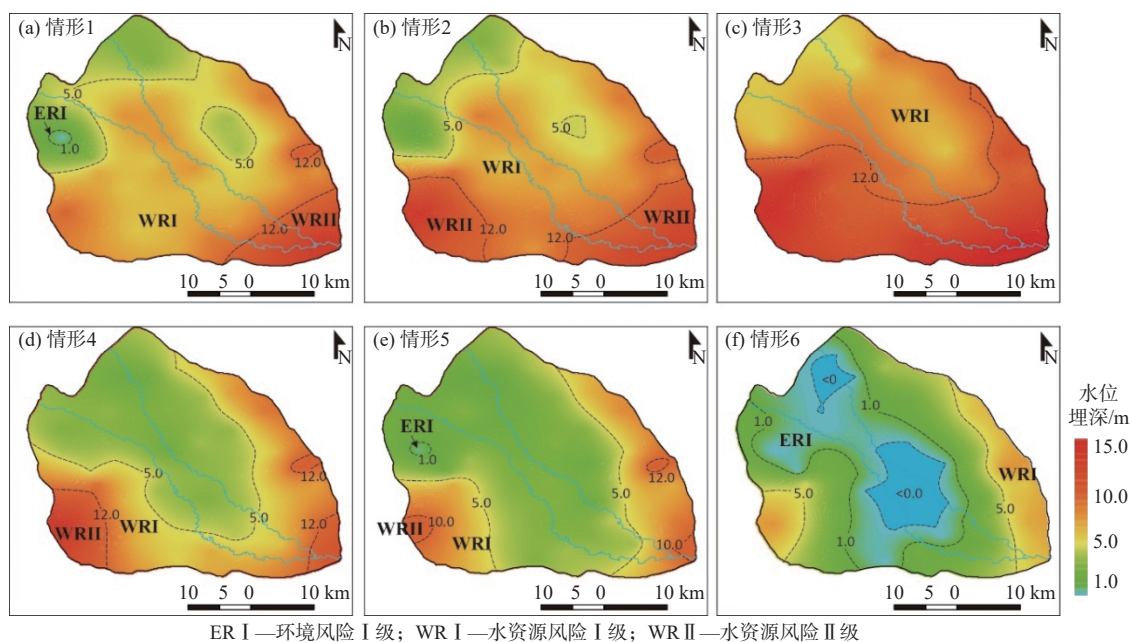


图 4 不同方案条件下水位埋深分布图及风险等级区划

Fig. 4 Burial depth of water table and risk classification under six different scenarios

3), 则导致区内潜水风险加剧, 将近一半区域存在高度资源风险(图 4c)。

后三种不同水资源规划方案的实施, 将不同程度地缓解区内潜水资源风险。如图 4(d) 所示, 修建地下水库开展人工调蓄(情形 4), 洮儿河高度资源风险区域面积降低至 14 km^2 , 但人工调蓄条件下, 由于开采与补给具有反相关特点, 旱季开采量较大、而丰水期未能得到充分的补给, 导致研究区的西南部出现了水资源高风险区域。在现状条件下, 采取节水灌溉措施可使区内潜水资源风险和环境风险程度普遍降低, 全区仅有不到 10 km^2 的区域存在高度资源风险(图 4e)。而旱田改水田工程的实施(图 4f), 可使区内潜水水位明显抬升, 部分位置甚至出现地下水补给河水(水位埋深低于 0 m)。尽管旱改水工程有效抑制了水资源风险, 但沿河两岸存在次生盐碱化生态环境风险区域面积超过 700 km^2 。

不同情形下潜水水位埋深的概率分布显示, 潜水资源无序开采时(图 5a), 潜水水位埋深较少处于低风险区域, 甚至超过 40% 的潜水水位埋深处于高度资源风险状态。因此认为: 地下水资源的无序开采是导致研究区潜水资源枯竭最主要的因素。采取水资源管理措施后(图 5b), 可使区内地下水位埋深普遍减小, 即旱田改水田(情形 6)条件下水位恢复效果最为明显, 但却普遍存在高环境风险区域。相比而言, 节水灌溉可使潜水水位埋深较大概率存在于低风险区域, 兼顾资源需求和环境效应, 较其他方法优势明显。

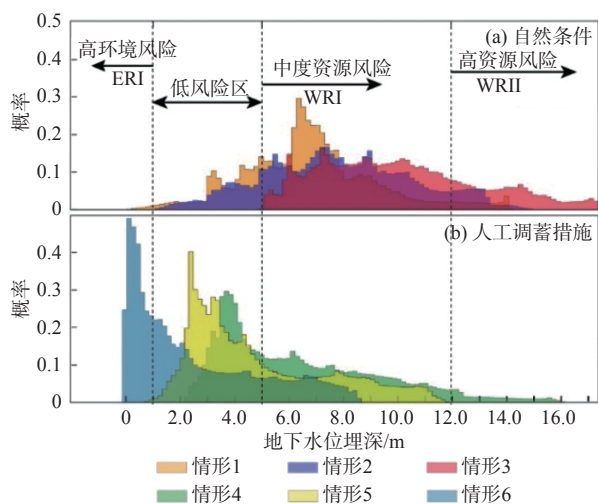


图 5 不同方案条件下地下水位埋深概率分布(水位埋深为负值代表水位高于地面)

Fig. 5 Probabilistic distribution of the buried depth of groundwater table under six scenarios (Negative values indicates the water level higher than the land surface)

5 结论

此次研究以洮儿河流域为例, 定义了潜水资源风险和生态环境风险, 并通过随机模拟的方法, 对比 3 种现状条件、3 种水资源管理措施条件下区内潜水资源与环境风险, 得到主要结论:

(1) 潜水资源无序开采, 是导致研究区资源风险加剧的主要诱因。

(2) 地下水库人工调蓄、旱田改水田、节水灌溉均可使区内潜水水位得到明显恢复, 其中旱田改水田工程实施后潜水水位恢复效果最为明显, 同时也加剧了次生盐碱化造成的生态环境风险; 节水灌溉在满足区内灌溉需求的前提下, 可将区内净开采强度降低 $2.0 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 保障区内潜水水位埋深处于合理范围之内 ($1 \sim 12 \text{ m}$ 之间)。从潜水资源风险与生态环境风险两方面考虑, 节水灌溉是目前吉林省西部水资源利用最有效的管理方法。

(3) 循环神经网络成功预测降水和河流入渗补给量, 确定了中长期地下水位变化驱动因子; 随机过程模拟计算中长期地下水位变化的同时, 可明确地下水位变化的不确定性。神经网络和随机过程模拟相结合, 提高了地下水位预测的可靠度, 为干旱半干旱地区地下水资源利用与管理提供了新的方法。

参考文献 (References):

- [1] 神祥金, 吴正方, 杜海波. 近 50 年来吉林西部半干旱区气候变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 25(2): 190 - 196. [SHEN Xiangjin, WU Zhengfang, DU Haibo. Characteristics of climatic change in semiarid region of western Jilin in recent 50a[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 25(2): 190 - 196. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李海毅, 汤洁, 斯蒿. 分形理论在吉林西部干旱指数预测中的应用[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2007, 39(1): 126 - 130. [LI Haiyi, TANG Jie, SI Ai. Application of fractal theory in forecasting the drought index in the west of Jilin Province[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2007, 39(1): 126 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 戴长雷. 地下水调控研究——以饮马河中游为例[D]. 长春: 吉林大学, 2006. [DAI Changlei. Study on groundwater reservoir regulation with a case of the middle reaches of Yinma river[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 林年丰, 汤洁. 松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒

- 漠化的成因分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(4): 474 – 483. [LIN Nianfeng, TANG Jie. Study on the environment evolution and the analysis of causes to land salinization and desertification in Songnen plain[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(4): 474 – 483. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 肖霄. 吉林省洮儿河扇形地地下水库人工调蓄理论与技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. [XIAO Xiao. Research on the theory and technology of groundwater reservoir artificial regulation of Taoer River alluvial fan in Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄彦, 司振江, 李芳花, 等. 大型灌区节水改造技术集成研究与示范[J]. *水利科学与寒区工程*, 2018, 1(6): 8 – 14. [HUANG Yan, SI Zhengjiang, LI Fanghua, et al. Research and demonstration of key technologies for water saving reform in large scale irrigation aera[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2018, 1(6): 8 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 范语思, 李月芬, 张玉树, 等. 吉林西部县域“旱改水”时空演变特征及驱动机制分析[J]. *世界地质*, 2020, 39(2): 444 – 451. [FAN Yusi, LI Yuefen, ZHANG Yushu, et al. Analysis on spatiotemporal evolution and its driving mechanism of conversion from dryland into paddy field at County scale in western Jilin Province[J]. *Global Geology*, 2020, 39(2): 444 – 451. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 汤洁, 陈静书, 李昭阳, 等. 吉林西部盐碱农田有机碳矿化和激发效应对氮磷添加的响应[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(3):1–11. [TANG Jie, CHEN Jingshu, LI Zhaoyang, et al. Response of organic carbon mineralization and priming effect to nitrogen and phosphorus addition in saline-alkali farmland of western Jilin province, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(3):1–11.(in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨沁瑜, 张尧, 刘家福. 基于蚁群模型的吉林西部土地利用安全格局情景模拟研究[J]. *长春师范大学学报*, 2020, 39 (2), 97–103. [YANG Qinyu, ZHANG Yao, LIU Jiafu. Simulation of land use security pattern in western Jilin province based on ant colony model[J]. *Journal of Changchun Normal University*, 2020, 39 (2): 97–103.(in Chinese with English abstract)]
- [10] 才源, 曹扬, 李子勇, 等. 吉林省西部盐碱地状况的调查与分析[J]. *农业与技术*, 2019, 39(19): 48–52. [CAI Yuan, CAO Yang, LI Ziyong, et al. Survey and analysis of saline soil distribution in Western Jilin Province[J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39(19): 48–52. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 鲍硕超, 王清, 卞建民. 吉林省大安地区盐渍土室内冻胀试验研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1701–1707. [BAO Shuochao, WANG Qing, BIAN Jianmin. Indoor frost heaving experiment of saline soil in Da'an area, Jilin Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1701–1707. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 卞建民, 刘彩虹, 杨晓舟. 吉林西部大安灌区土壤贮水能力空间变异特征及土壤水分有效性[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(2): 554–563. [BIAN Jianmin, LIU Caihong, YANG Xiaozhou. Spatial distribution of soil water storage capacity and soil water availability in West Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(2): 554–563. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张瑜, 徐子棋, 杨献坤. 不同改良剂对吉林西部重度盐碱土的改良及牧草的增产[J]. *森林工程*, 2020, 36(2): 25 – 34. [ZHANG Yu, XU Ziqi, YANG Xiankun. Effects of different soil amendments on the soil improving and the forage grass yield increasing on the severe saline-alkali soil in the western Jilin Province[J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(2): 25 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LI Y F, GONG H Y, LI S J, et al. Ecological stoichiometry homeostasis of six microelements in leymus chinensis growing in soda saline-alkali soil[J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 4226.
- [15] 章光新, 邓伟, 何岩. 洮儿河流域地下水TDS时空变异特征研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 122 – 124. [ZHANG Guangxin, DENG Wei, HE Yan. Characteristics of spatial and temporal variation of TDS of groundwater in tao'er river basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 122 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱琳, 苏小四. 吉林西部地区第四系潜水水质影响因素的R型因子分析[J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(1): 51 – 56. [ZHU Lin, SU Xiaosi. Application of R-mode analysis in determining influencing factors of quaternary unconfined groundwater quality in west area of Jilin Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(1): 51 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王宇, 卢文喜, 卞建民, 等. 三种地下水位动态预测模型在吉林西部的应用与对比[J]. *吉林大学学报(地球*

- 科学版), 2015, 45(3):886–891. [WANG Yu, LU Wenxi, BIAN Jianmin, et al. Comparison of three dynamic models for groundwater in western Jilin and the application[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(3):886–891.(in Chinese with English abstract)]
- [18] 卞建民, 汤洁, 封灵, 等. 吉林西部砷中毒区水文地球化学特征[J]. [水文地质工程地质](#), 2009, 36(5): 80 – 83. [BIAN Jianmin, TANG Jie, FENG Ling, et al. Hydrogeochemical characteristics in the arsenic poisoning area in western Jilin Province[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2009, 36(5): 80 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [19] POORNIMA S, PUSHPALATHA M. Prediction of rainfall using intensified LSTM based recurrent neural network with weighted linear units[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(11): 1 – 18.
- [20] 陈萃, 张幼宽, 王长申. 基于时间序列分析的辛安泉流量变化研究[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(1):19–23. [CHEN Luo, ZHANG Youkuan, WANG Changshen. A study of evolution of the discharge of the Xin'an Spring with time series analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1):19–23.(in Chinese with English abstract)]
- [21] 凤蔚, 祁晓凡, 李海涛, 等. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 1–8. [FENG Wei, QI Xiaofan, LI Haitao, et al. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*, 2020, 51 (7): 1–13. [JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51 (7): 1–13 (in Chinese with English abstract)]
- [23] 杨果岳, 方明, 孙希望, 等. 基于递归图理论的沉降时间序列可预测分析[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 158 – 164. [YANG Guoyue, FANG Ming, SUN Xiwang, et al. Predictability analysis of the settlement time series based on the theory of recurrence plots[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 158 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [24] CONNOR J T, MARTIN R D, ATLAS L E. Recurrent neural networks and robust time series prediction[J]. [IEEE Transactions on Neural Networks](#), 1994, 5(2): 240 – 254.
- [25] KINGMA D P, BA J L. Adam: A method for stochastic optimization[M]. Toronto: International Conference on Learning Representations, 2015.
- [26] NEUMAN S P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table[J]. [Water Resources Research](#), 1972, 8(4): 1031 – 1045.
- [27] Diersch, H J G. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media[M]. Germany: Springer Science & Business Media, 2013:10-68.
- [28] 陈社明. 吉林西部浅层地下水系统对旱改水工程的响应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. [CHEN Sheming. The effect of dry land to wet land on shallow aquifer in western Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [29] REHFELDT K R, BOGGS J M, GELHAR L W. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 3. Geostatistical analysis of hydraulic conductivity[J]. [Water Resources Research](#), 1992, 28(12): 3309 – 3324.

编辑: 张若琳