



三江平原地下水

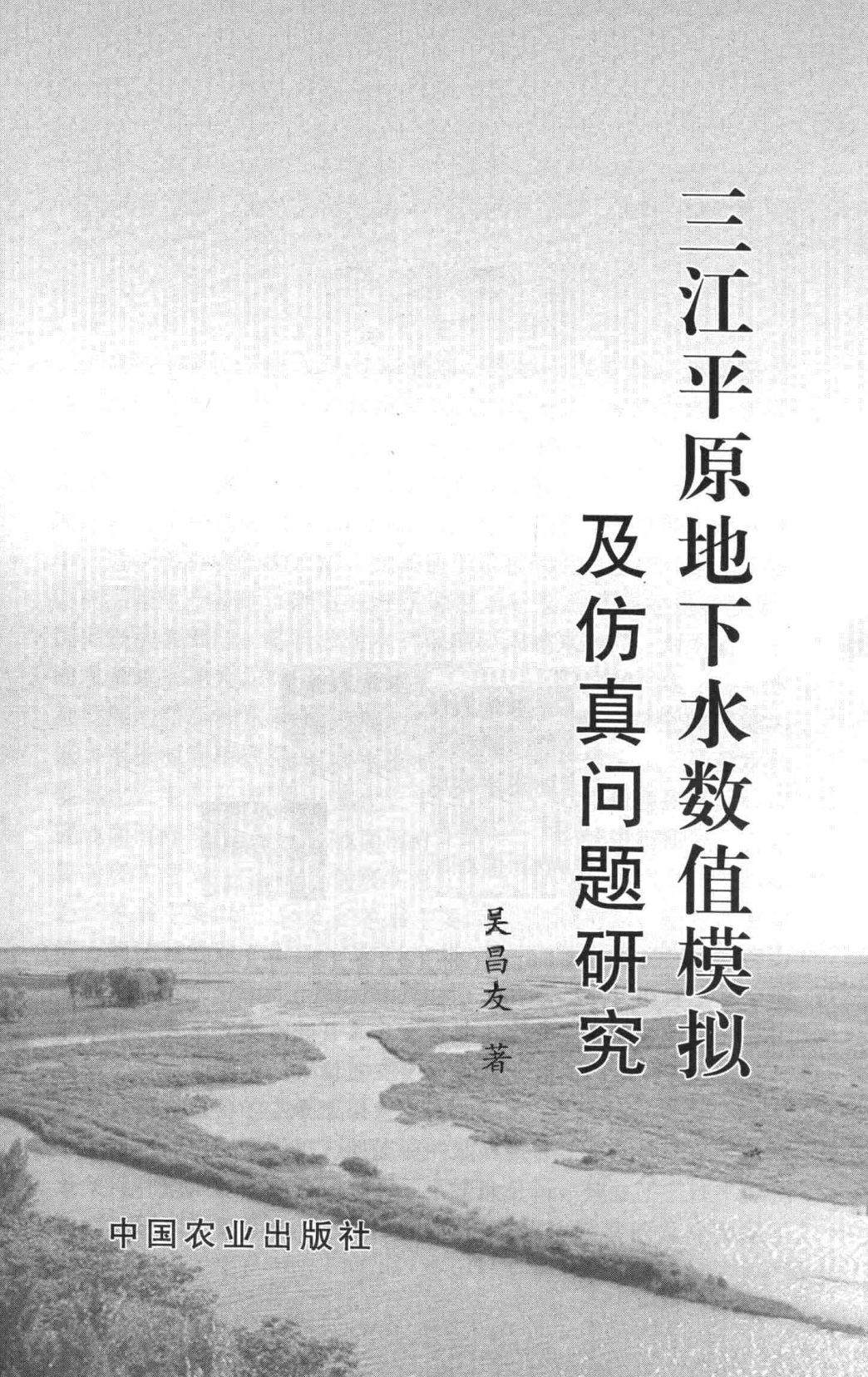
数值模拟及仿真问题研究

SANJIANG PINGYUAN DIXIASHUI SHUZHIMONI
JI FANGZHEN WENTI YANJIU

吴昌友◎著



中国农业出版社



三江平原地下水数值模拟
及仿真问题研究

吴昌友 著

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

三江平原地下水数值模拟及仿真问题研究 / 吴昌友
著. —北京: 中国农业出版社, 2011. 5
ISBN 978-7-109-15629-6

I. ①三… II. ①吴… III. ①三江平原-地下水-数值模拟-研究②三江平原-地下水-仿真-研究 IV.
①P641. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 075322 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 刘明昌

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 6.375

字数: 180 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 22.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

摘 要

三江平原位于黑龙江省东北部，西邻小兴安岭，北靠黑龙江，东依乌苏里江，土地总面积 10.88 万 km^2 ，是松花江、黑龙江和乌苏里江不断迁徙和泛滥所形成的冲积平原，其土地平坦，面积广阔，土质肥沃，属于世界三大黑土带之一。该区耕地集中连片，人均耕地面积达 1hm^2 以上。三江平原气候温和，雨量适中，适于多种农作物栽培，尤其适于水稻和大豆生产，是国家重要商品粮生产基地。随着三江平原区域社会、经济的迅速发展，国民经济各部门、各行业对水利保障要求越来越高，对水资源的需求量越来越大，对水环境的保护要求越来越迫切。由于多年水利发展的滞后和水利工程建设薄弱，本区水利安全保障能力低，水资源利用缺乏统一规划，水资源供需矛盾突出，导致水环境恶化，生态环境质量降低，平原区内地下水水位急剧下降，出现地面沉降等现象，所以对三江平原地下水系统进行研究具有重要的现实意义。由于三江平原部分地区观测井和水文地质资料缺乏，本书主要以三江平原挠力河流域作为研究对象，对三江平原挠力河流域的地下水系统进行了系统分析，建立了三江平原挠力河流域地下水分布式模型，在模型识别的基础上，设计了三个地下水开采方案。在不同开采方案条件下，分别采用地下水分布式模型进行模拟预报，并对这三个方案模拟预报的结果进行分析与评价。研究取得的主要成果有：

(1) 对三江平原挠力河流域的地质条件、水文地质条件、气象条件和地下水分布特征进行了系统地分析，建立了三江平原挠力河流域水文地质概念模型，为地下水数学模型的建立奠定了基础。

(2) 建立了三江平原挠力河流域地下水三维数学模型, 并采用国际通用的地下水数值模拟软件 MODFLOW, 对挠力河流域地下水进行模拟仿真, 通过模型的识别和检验, 证明所建立的数学模型、边界条件和水文地质参数的确定符合实际情况。

(3) 本书对标准 BP 神经网络的基本原理进行系统分析, 指出标准 BP 神经网络的不足, 并对其进行改进, 提出了改进的 BP 神经网络模型。将改进的 BP 神经网络模型应用到降水量和蒸发量和第一类边界条件的预测中, 建立了降水量、蒸发量和第一类边界条件的神经网络时间序列模型。对 2008—2020 年降水量、蒸发量和第一类边界条件进行预测, 预测中得到的年平均降水量为 499.1mm, 接近于近 30 年平均值 486.3mm; 预测中得到的年平均蒸发量为 717.9mm, 接近于近 20 年平均值 713.8mm。

(4) 利用改进 BP 神经网络时间序列预测模型对地下水动态变化的不确定因素 (指降水量、蒸发量和第一类边界条件) 进行预测, 将这些不确定的因素作为随机时间序列耦合到挠力河流域的地下水确定性模型中, 进而建立了三江平原挠力河流域地下水确定性—随机耦合模型。

(5) 本书将 Elman 神经网络模型和小波分析理论进行耦合, 建立了 Elman 小波神经网络模型, 并首次将 Elman 小波神经网络模型应用到挠力河流与地下水开采量的预测中, 建立了地下水开采量的 Elman 小波神经网络模型, 对 2008—2020 年地下水开采量进行预报, 取得了较好的效果。

(6) 本书对未来地下水开采量设计了 3 个开采方案, 其中以 2005 年的地下水开采量作为第一个开采方案, 以黑龙江省水利综合规划中的开采量作为第二开采方案, 以 Elman 小波神经网络模型预测的地下水开采量作为第三方案。采用建立的确定性—随机耦合模型分别对不同方案条件下 2007—2020 年挠力河流域地下水进行模拟, 模拟结果表明, 第三开采方案地下水位降深最

大，其次是第一开采方案，第二开采方案降深较小。如果按着第二开采方案对三江平原挠力河流域地下水进行开采，有利于解决地下水水位下降、地面下沉和水环境恶化等现象，有利于三江平原水资源可持续开发和利用。

关键词：三江平原；挠力河流域；地下水；数值模拟；预测

Abstract

Sanjiang Plain is located in north-east of Heilongjiang Province, in the west next to the Xiaoxing'anling, in the north near the Heilongjiang, lean the Wusuli River in the east, the total land area is 108,800 square km, which is formed alluvial flood plains by the Songhua river, Heilongjiang and Wusuli constant movement and flooding, its land flat, vast area, fertile soil, belong to one of the three black belts of the world. the area concentrated area of arable land, per capita arable land area is more than 15 acres. Sanjiang plain, which has mild climate and rainfall, suitable for a wide range of crops cultivation, especially suitable for rice and soybean production, its an important commodity grain production base in our country. With the Sanjiang plain regional society, rapid economic development, national economic departments and industries on water security requires more and more high, demand on more and more water resource, more and more urgent demands on protection the water environment. Because of water development delayed for many years and the weak water conservancy project construction, the area's water safety and security capacity is low, lack of uniform use of water resources planning, the contradiction between water supply and demand is obvious. leading to deterioration of water environment, ecological environment quantity in lower, groundwater levels of plain region sharp decline, arising land subsidence and other phenomenon, and thus carrying out the research on San-

jiang plain groundwater system has important practical significance. Because of observation wells and hydrogeological information lacking in parts of the Sanjiang plain, the issue mainly taken the Naoli river basin of Sanjiang plain as a research object, making the system analysis for groundwater of Naoli river basin in Sanjiang plain, set up the groundwater distributed model for Naoli river basin in Sanjiang plain. On the basis of model identification, we designed three groundwater exploitation program. in different conditions of exploitation programs, seperately used groundwater distributed model to simulate and forecast, and making the analysis and evaluation for the simulation prediction results of these three programs. the research has made the main achievements as follows:

(1) Carried out the system analysis for geological conditions, hydrogeological conditions, weather conditions and characteristics of underground water distribution in Naoli river basin of Sanjiang plain, set up the hydrogeological conceptual model for Naoli river basin of Sanjiang plain, laid the foundation for setting up the groundwater mathematical model.

(2) Set up the three-dimensional mathematical model for groundwater of Naoli river basin in Sanjiang plain, and adoption of MODFLOW which is international common groundwater numerical simulation software, carried out the groundwater simulation on Naoli river basin, through the model identification and testing, proved the mathematical model, boundary conditions and hydrogeological parameters determination in line with the actual situation.

(3) In this paper, carried out the systems analysis for the basic principles of standard BP neural network, pointed out the

deficiencies of standard BP neural network and improved it, proposed the improved BP neural network model. The improved BP neural network model was applied to prediction of precipitation and evaporation and the first boundary condition , and set up the neural network time series model of precipitation, evaporation and the first boundary condition . predicted the precipitation, evaporation and the first boundary condition from 2008 to 2020 , the average annual rainfall that obtained from prediction is 499.1mm, which close to the average value of 486.3mm of the past 30 years; the average annual evaporation that obtained from prediction is 717.9mm, which close to the average value of 713.8mm in the past 20 years. Using time series prediction model of improved BP neural network to predict the groundwater dynamic uncertainty factors that contained precipitation and evaporation and the first boundary condition, taking these uncertainties as a random time series coupled into groundwater of Naoli river basin certainty model, and then set up the groundwater certainty-random coupling model for Naoli river basin of Sanjiang plain.

(5) In this paper, coupling the Elman neural network model and wavelet analysis theory , set up the Elman wavelet neural network model, and the wavelet Elman neural network model was applied to predict the groundwater exploitation amount in Naoli rivers , set up the Elman wavelet neural network model of groundwater exploitation amount, forecasted the volume of groundwater exploitation from years of 2008 to2020, and achieved good results.

(6) In this paper, designed the three exploitation programs for the volume of groundwater exploitation in the future, taking

the exploitation of groundwater in 2005 as the first extraction program; for the integrated planning of water in Heilongjiang province as a second exploration program; for groundwater extraction is predicted by Elman wavelet neural network model as a third program. using of established certainty-random coupling model to separately simulate groundwater under the conditions of different programs in Naoli river basin from the year of 2007 to 2020, simulation results show that groundwater for the third exploitation program down deep the most, followed by the first exploration program, the second exploitation program deep down smallest. If according to the second exploration program on the exploitation of groundwater for the Naoli river basin of Sanjiang plain, which will help solve the lowering of ground water levels, ground subsidence and other water environment degradation phenomenon, which is conducive to the sustainable development of the Sanjiang plain and the use of water resources.

Keywords: Sanjiang plain; Naoli river basin; groundwater; Numerical simulation; forecast

目 录

摘要

Abstract

| | |
|------------------------------|----|
| 1 引言 | 1 |
| 1.1 研究的目的和意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究动态 | 4 |
| 1.2.1 三江平原地下水的研究现状 | 4 |
| 1.2.2 地下水系统数值模拟国内外研究动态 | 5 |
| 1.2.3 地下水系统参数识别国内外研究动态 | 10 |
| 1.3 研究的主要内容、方法和技术路线 | 14 |
| 1.3.1 研究的主要内容 | 15 |
| 1.3.2 研究的方法和技术路线 | 16 |
| 2 挠力河流域的基本概况 | 19 |
| 2.1 自然地理概况 | 19 |
| 2.1.1 地理位置 | 19 |
| 2.1.2 气象条件 | 19 |
| 2.1.3 水文条件 | 21 |
| 2.2 区域地质概括 | 23 |
| 2.2.1 地形地貌 | 23 |
| 2.2.2 地层岩性 | 25 |
| 2.2.3 水文地质条件 | 29 |
| 2.3 社会经济状况 | 30 |
| 2.4 水资源开发利用状况及存在问题 | 31 |

| | | |
|----------|-------------------------------|-----------|
| 2.4.1 | 供水工程状况 | 31 |
| 2.4.2 | 水资源利用状况 | 32 |
| 2.4.3 | 地下水开发利用中存在的问题 | 36 |
| 3 | 挠力河流域地下水系统分析 | 39 |
| 3.1 | 地下水系统概述 | 39 |
| 3.1.1 | 地下水系统的基本概念 | 39 |
| 3.1.2 | 挠力河流域地下水系统概述 | 39 |
| 3.2 | 含水层系统分析 | 41 |
| 3.2.1 | 第四系孔隙含水层亚系统 | 41 |
| 3.2.2 | 第三系孔隙裂隙含水层亚系统 | 44 |
| 3.2.3 | 前第四系基岩裂隙含水层亚系统 | 44 |
| 3.3 | 地下水系统流动分析 | 45 |
| 3.3.1 | 浅层地下水循环系统 | 46 |
| 3.3.2 | 深层地下水循环系统 | 49 |
| 3.4 | 地下水系统化学特征 | 50 |
| 3.4.1 | 第四系松散岩类孔隙水水化学系统 | 51 |
| 3.4.2 | 第三系碎屑岩裂隙孔隙水水化学系统 | 52 |
| 3.4.3 | 前第四系基岩裂隙水水化学系统 | 53 |
| 3.5 | 地下水系统动态分析 | 53 |
| 3.5.1 | 地下水动态类型 | 53 |
| 3.5.2 | 地下水位动态影响分析 | 55 |
| 4 | 挠力河流域地下水参数及水均衡分析 | 58 |
| 4.1 | 挠力河流域均衡区和均衡时段的划分 | 58 |
| 4.1.1 | 均衡区和均衡时段划分 | 58 |
| 4.1.2 | 水量均衡方程 | 60 |
| 4.2 | 水文地质参数 | 60 |
| 4.2.1 | 渗透系数 | 61 |

| | | |
|-------|----------------|-----|
| 4.2.2 | 给水度和弹性释水系数 | 61 |
| 4.2.3 | 潜水蒸发强度 | 63 |
| 4.2.4 | 降水入渗补给系数 | 64 |
| 4.2.5 | 灌溉回归入渗系数 | 66 |
| 4.3 | 流域年地下水资源量分析 | 66 |
| 4.3.1 | 流域地下水补给量 | 66 |
| 4.3.2 | 流域地下水排泄量 | 71 |
| 4.4 | 流域地下水资源总量估算 | 74 |
| 4.4.1 | 现状基准年(2005年) | 74 |
| 4.4.2 | 多年平均地下水资源量 | 77 |
| 5 | 挠力河流域地下水数值模拟 | 80 |
| 5.1 | 模型的研究范围 | 80 |
| 5.2 | 含水层的概化 | 81 |
| 5.2.1 | 含水层结构的概化 | 81 |
| 5.2.2 | 含水层水力特征的概化 | 81 |
| 5.2.3 | 边界条件概化 | 82 |
| 5.3 | 地下水流数学模型的建立及求解 | 83 |
| 5.3.1 | 地下水流数学模型的建立 | 83 |
| 5.3.2 | 地下水流数学模型的求解 | 85 |
| 5.3.3 | 空间离散 | 87 |
| 5.3.4 | 时间的离散 | 88 |
| 5.3.5 | 水文地质参数分区和初值的确定 | 88 |
| 5.3.6 | 源汇项的处理 | 89 |
| 5.3.7 | 边界条件的处理 | 95 |
| 5.3.8 | 地下水的初始水位 | 98 |
| 5.4 | 地下水流模型的识别和检验 | 99 |
| 5.4.1 | 地下水流模型的识别 | 99 |
| 5.4.2 | 地下水流模型的检验 | 100 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|------------|
| 5.5 | 水量均衡分析 | 107 |
| 6 | 神经网络时间序列预测模型 | 110 |
| 6.1 | BP 神经网络模型 | 111 |
| 6.1.1 | BP 神经网络的结构 | 111 |
| 6.1.2 | BP 神经网络的学习算法 | 111 |
| 6.2 | BP 神经网络的改进 | 115 |
| 6.2.1 | BP 神经网络的改进措施简介 | 115 |
| 6.2.2 | BP 神经网络改进的思路 | 117 |
| 6.2.3 | 改进的 BP 神经网络步骤 | 122 |
| 6.3 | 改进 BP 神经网络时间序列预测模型 | 123 |
| 6.4 | 大气降水量的神经网络时间序列预测模型 | 126 |
| 6.4.1 | 挠力河流域降水量特征分析 | 126 |
| 6.4.2 | 模型的建立 | 129 |
| 6.4.3 | 模型的检验 | 131 |
| 6.4.4 | 预测 2008—2020 年降水量 | 133 |
| 6.5 | 蒸发量的神经网络时间序列预测模型 | 134 |
| 6.5.1 | 挠力河流域蒸发量特征分析 | 134 |
| 6.5.2 | 模型的建立 | 136 |
| 6.5.3 | 模型的检验 | 137 |
| 6.5.4 | 预测 2008—2020 年蒸发量 | 139 |
| 6.6 | 第一类边界水位的神经网络时间序列预测模型 | 140 |
| 6.6.1 | 模型的建立 | 140 |
| 6.6.2 | 模型的检验 | 141 |
| 6.6.3 | 第一类边界水位的长期预测 | 143 |
| 7 | 地下水动态预测的确定性—随机耦合模型研究 | 146 |
| 7.1 | 确定性—随机耦合模型 | 146 |
| 7.1.1 | 确定性模型的离散 | 146 |

目 录

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 7.1.2 耦合模型的构成 | 151 |
| 7.1.3 耦合模型的求解方法 | 152 |
| 7.2 地下水开采量的预报模型 | 154 |
| 7.2.1 Elman 小波神经网络模型 | 154 |
| 7.2.2 基于 Elman 小波神经网络的地下水开采量预测 | 158 |
| 7.2.3 2020 年挠力河流域地下水开采量的预测 | 161 |
| 7.3 地下水开采方案的设计 | 161 |
| 7.4 2020 年地下水位动态预测 | 164 |
| 7.4.1 汇源项的离散 | 164 |
| 7.4.2 地下水位预测及结果分析 | 169 |
| 8 结论 | 172 |
| 参考文献 | 175 |
| 后记 | 186 |

1 引言

1.1 研究的目的是和意义

本研究依托于教育部博士点基金资助项目《三江平原地下水分布式模型及仿真问题研究》(200802240010)。

水是人类赖以生存的宝贵资源,又是重要的战略资源,它与一个国家和地区的经济持续发展和社会稳定息息相关。联合国发出警告,“在未来的5年,全球约有30亿人口面临严重缺水的局面”,“水危机将成为继石油危机之后又一个严重的全球危机”,一些学者预言,“未来的战争将为水而战”。中国是水资源十分短缺的国家,人均水资源占有量只有 $2\,200\text{m}^3$,国际组织公认的水缺乏警戒线是人均 $1\,800\text{m}^3$ 。据预测2030年中国将达到人口最高峰值16亿,人均水资源拥有量将会滑落到警戒线之下的 $1\,700\text{m}^3$,因而中国水资源面临严峻的挑战,必须科学合理地开发和利用。

三江平原地处于黑龙江省东北部,位于 $\text{N}47^{\circ}11'30''\sim\text{N}48^{\circ}21'25''$ 、 $\text{E}129^{\circ}46'42''\sim\text{E}134^{\circ}45'20''$,包括黑龙江、松花江与乌苏里江三江汇流的三角地带,其范围东起乌苏里江,西接汤旺河与牡丹江,南到兴凯湖与绥芬河分水岭,北至黑龙江。三江平原分为冲积三江低平原和冲积兴凯湖湖底平原两部分,区内地势低平,地面比降 $1/10\,000$,总面积 $108\,800\text{km}^2$ 。经过近50年的开发,已成为国家重要商品粮基地,现有耕地 $3.51\times 10^4\text{km}^2$,不同类型自然保护区44处,还拥有我国最大面积的湿地,随着经济社会的发展和人们对生态环境认识的不断深化,该地区的涉水矛盾日益突出。由于三江平原地势低洼,加之水利工程基础薄

弱，特别是为工农业生产供水的水源工程更是缺乏，部分流域的河道断流、局部地区地下水超采，地下水位急剧下降，重新评估三江平原地下水资源，已成为农业生产的一项重要课题，只有掌握地下水运动的变化规律，才能有效地进行改良土壤、防止土壤盐渍化和沼泽化，从而实现生态环境的良性发展和资源永续利用。2005年水利部规划总院审查通过《黑龙江省三江平原“两江一湖”干流沿岸灌区规划》。根据规划，拟在“两江一湖”干流沿岸投资99亿元，建设绥滨灌区、乌苏镇灌区和兴凯湖灌区等14处提水灌区，发展水田灌溉面积1109万亩^①，其中新增682万亩，改善427万亩，增产优质水稻40亿kg。开发利用“两江一湖”流域农业资源，不仅可以增产粮食，还可以利用灌溉退水和非灌溉季节引水给湿地补水，改善当地生态环境，实现可持续发展。

三江平原在未大规模开发前，由于气候湿润，水分充沛，平原区地表低洼，排水不畅，从而形成沼泽纵横交错、草木丰美葳蕤的以自然生态系统为主的北国水乡的自然景观。这种以水为主的湿生环境，生长发育了茂密的喜湿植物群落和岛状森林，构成以湿地生态体系为主的自然生态体系。进入20世纪80年代，党和国家针对我国人增地减的趋势，为使我国农业生产冲破连续几年徘徊的局面，国务院决定把三江平原列为国家的重点农业综合开发区。根据当地的土壤和水文地质条件，经过实践证明，该地区以开发井灌水稻为宜。经过开发，到目前为止，三江平原已有井灌水稻面积1400余万亩，每年抽取地下水约 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在开发初期，地下水动态变化没有引起人们的足够重视，基本处于较为原始的状态，地下水开采量还较少。但是，在20世纪90年代后，由于井灌水稻生产抽取大量的地下水，地下水进入大规模开采阶段，出现了水位区域性下降，年平均降速0.5~1m，局

① 亩为非法定计量单位，15亩=1公顷。——编者注