

分类号：
学号：20212510040

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



石河子灌区地下水位动态分析及适宜水位 控制技术研究

学位申请人	王文赞
指导教师	杨广 教授
	丁国梁 正高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2024年05月

分类号：
学号：20212510040

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



石河子灌区地下水位动态分析及适宜水位 控制技术研究

学位申请人	王文赞
指导教师	杨广 教授
	丁国梁 正高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2024年05月

**Study on dynamic analysis of groundwater level and appropriate
water level control technology in Shihezi irrigation area**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Wang Wenzan

(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Yang Guang

May,2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 王文赞

时间： 2024 年 5 月 5 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 王文赞

时间： 2024 年 5 月 5 日

导师签名： 杨子

时间： 2024 年 5 月 5 日

本文得到以下项目资助

1. 兵团科技合作计划项目“兵团典型灌区地下水利用关键技术研究”（2022BC001）；
2. 八师石河子市重点研发计划项目“兵团第八师石河子市地下水资源合理利用关键技术研究”（2023NY01）；
3. 兵团南疆重点产业发展支撑计划课题“塔河下游多通道输水的生态水调控技术研发与示范”（2022DB023）；
4. 第三次新疆综合科学考察项目“天山北坡水资源承载力与水安全要素基础性调查”课题“地表水资源开发状况调查”（2021xjkk0804）；

Acknowledgements

1. Science and Technology Cooperation Program of XPCC "Key Technologies for Groundwater Utilization in Typical Irrigation Areas of the XPCC" (2022BC001);
2. Key science and technology project of Shihezi City "Key technologies Research for rational utilization of groundwater resources in Shihezi City"(2023NY01);
3. Key Development Project of XPCC "Research and Demonstration of ecological water control technology for Multi-channel water transport in the Lower Tarim River" (2022DB023);
4. The Third Comprehensive Scientific Expedition of Xinjiang "Basic Investigation of Water Resources Carrying Capacity and Water Security Elements on the North Slope of Tianshan Mountain", "Investigation of Surface Water Resources Exploitation Status" (2021xjkk0804);

摘要

目的：石河子灌区位于天山北坡中段、准噶尔盆地南缘，是西北干旱地区典型绿洲灌区，地下水作为地表水补充水源，对于区域农业灌溉和可持续发展意义重大。探究石河子灌区地下水位变化特征及其影响因素，通过构建三维地下水数值模型模拟区域地下水位变化，提出区域地下水资源调控方案，为区域地下水资源可持续利用提供科技支撑。

方法：本文在分析石河子灌区地下水位时空间变化规律基础上，通过灰色关联度与通径分析相结合方法对灌区地下水位变化特征进行敏感性分析；结合区域地下水补给量和排泄量水均衡计算分析石河子灌区地下水储量变化；基于区域水文地质条件建立地下水运动非稳定流数值模拟模型；针对用水量采用不同地下水调控方案控制区域地下水位，根据不同情景下地下水位模拟预测结果分析确定最优地下水调控方案。

结果：(1) 2012~2019年石河子灌区地下水位整体呈现上升趋势，波动幅度为 12.26 m~14.14 m。灌区地下水位衬度系数方差值为 0.04~11.31，中部地下水位波动幅度高于北部和南部；灌区灌溉面积和蒸发量为石河子灌区地下水位变化最主要影响因子。根据地下水均衡计算得到地下水储变量为 $6211.11 \times 10^4 \text{m}^3$ ，石河子灌区 2016 年地下水总体上处于正均衡状态，相对均衡差为 7.9%，满足水均衡计算精度要求。

(2) 基于地下水在三维空间流动的偏微分方程及 Visual MODFLOW 软件构建了石河子灌区地下水数值模型。依据研究区内 22 个监测井实测数据进行模型初始搭建和验证，得到石河子灌区流场拟合表示的模拟水位与实测水位关系图，模型经过率定与验证之后可以得到模型的精度可靠性及拟合度较高，模型的水文地质概化、边界条件、参数分区设置合理，本研究所构建的石河子灌区地下水数值模型能够客观地反映研究区地下水位动态变化特征。

(3) 选择合理区域进行适宜的调控，提高地下水调控的效能和针对性，确定地下水埋深权重为 0.18，井密度指标权重为 0.82，计算得到综合评价价值越大的区域越需要地下水调控。相较于全区域均匀比例削减水量的调控方案 (Y_3)，削减综合评价高于 0.20 的区域的调控方案 (Y_1) 和削减综合评价高于 0.32 的区域的调控方案 (Y_2) 对石河子灌区的地下水调控具有针对性，且调控井数相对较少。

结论：根据高评价价值高比例削减地下水开采量均可以改善地下水环境，提升地下水位，综合比较三个调控方案得到削减综合评价高于 0.20 的区域地下水调控方案 (Y_1) 对地下水位的调控效果较好。

关键词：地下水位；灰色关联度；通径分析；地下水数值模拟；地下水调控；石河子灌区

Abstract

Objective: The Shihezi irrigation area is located in the middle part of the northern slope of Tianshan Mountain and the southern edge of the Junggar Basin. It is a typical oasis irrigation area in the northwestern arid regions. Groundwater, as a vital source of surface water, plays a crucial role in regional agricultural irrigation and sustainable development. This study examines the characteristics and determinants of groundwater level changes in the Shihezi irrigation District, develops a three-dimensional groundwater numerical model to simulate the regional groundwater level change, and proposes a regional groundwater resource regulation scheme to provide scientific and technological support for the sustainable utilization of regional groundwater resources.

Methods: A study of the spatial variation of groundwater level in Shihezi irrigation district was conducted through a sensitivity analysis using the grey correlation degree and path analysis. The balance of regional groundwater recharge and excretion was calculated to analyze the changes in groundwater reserves in the Shihezi irrigation district. An unsteady flow numerical simulation model was established based on the regional hydrogeological conditions to simulate and predict the groundwater table under different scenarios. The optimal groundwater control schemes were determined based on the groundwater table simulation and prediction results and the total water consumption under different scenarios.

Results: (1) The groundwater level trend in Shihezi Irrigation District from 2012 to 2019 exhibited a general upward pattern, with a fluctuation range of 12.26 ~ 14.14 meters. The variance of the contrast coefficient for the groundwater table in the irrigated area ranges from 0.04 to 11.31, and the fluctuation range of the groundwater table in the central area was higher than that in the northern and southern areas. The primary factors influencing the groundwater level in the Shihezi irrigation district were the irrigation area and evaporation. Based on the groundwater balance calculation, the groundwater storage variable was estimated to be $6211.11 \times 10^4 \text{ m}^3$. In 2016, the groundwater in Shihezi Irrigation District was generally in a positive equilibrium state, with a relative equilibrium difference of 7.9%, which met the accuracy requirements of the water balance calculation.

(2) Utilizing the partial differential equation for groundwater flow in three-dimensional space and Visual MODFLOW software, a numerical model for groundwater flow in the Shihezi irrigation area was constructed. This model was initially developed and validated based on measured data from 22 monitoring wells in the study area, and a relationship diagram between the simulated and measured water levels was obtained for the Shihezi Irrigation District. Following the calibration and validation processes, the accuracy, reliability, and fitting degree of the model were determined, and the hydrogeological generalization,

boundary conditions, and parameter zoning of the model were found to be reasonable. The numerical model for groundwater in the Shihezi irrigation area effectively reflects the dynamic characteristics of groundwater levels in the study area.

(3) Identify a reasonable domain for effective and relevant groundwater regulation and management to enhance the efficacy of groundwater control measures in Shihezi irrigation District. The weight of the groundwater depth was determined to be 0.18, whereas the well density index had a weight of 0.82. In Comparison to the universal water reduction plan for the entire region (Y_3), the control strategies of areas with comprehensive evaluations higher than 0.20 (Y_1) and the control scheme of the area with comprehensive evaluation higher than 0.32 (Y_2) have specific impacts on groundwater management in Shihezi irrigation District, with a relatively limited number of control Wells required.

Conclusion: By lowering the extraction of groundwater in areas with high evaluation values and proportions, it is possible to improve the quality of groundwater and elevate groundwater levels. After conducting a thorough comparison of the three control schemes, it was determined that the regional groundwater control scheme (Y_1), with a comprehensive reduction evaluation of more than 0.20 is the most effective in terms of managing groundwater levels.

Key words: Groundwater level; Grey relational degree; Path analysis; Groundwater numerical simulation; Groundwater control; Shihezi irrigation District

目录

摘要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 地下水开发利用分析研究现状.....	2
1.2.2 地下水数值模拟研究现状.....	3
1.2.3 地下水位调控技术研究现状.....	4
1.2.4 玛纳斯河流域地下水研究现状.....	5
1.3 研究内容及技术路线.....	5
第 2 章 研究区概况.....	7
2.1 自然地理概况.....	7
2.1.1 地理位置.....	7
2.1.2 气象及水文条件.....	7
2.2 数据来源.....	11
2.3 水资源开发利用现状.....	11
2.4 土地利用变化.....	12
2.5 社会经济状况.....	13
第 3 章 石河子灌区地下水位动态变化特征及影响因子分析.....	14
3.1 石河子灌区地下水位变化特征.....	14
3.1.1 地下水位年际变化特征.....	14
3.1.2 地下水位年内变化特征.....	17
3.2 石河子灌区地下水位影响因子分析.....	19
3.2.1 灰色关联度分析.....	19
3.2.2 通径分析.....	20
3.2.3 不同分析方法的比较.....	24
3.3 地下水均衡分析.....	25
3.3.1 水量均衡方程建立.....	25
3.3.2 地下水补给项.....	25
3.3.3 地下水排泄项.....	31

3.3.4 地下水均衡分析	33
3.4 本章小结	34
第 4 章 石河子灌区三维地下水数值模拟模型的构建	36
4.1 Visual MODFLOW 地下水数值模拟方法介绍	36
4.1.1 地下水数值模拟理论基础	36
4.1.2 研究区地下水运动非稳定流数学模型方程	36
4.1.3 地下水数值模型求解流程	37
4.2 水文地质概念模型	37
4.2.1 研究区范围选定	37
4.2.2 含水层概化及边界条件	38
4.2.3 边界条件	38
4.3 模型参数的选用与处理	39
4.3.1 空间与时间离散	39
4.3.2 参数分区与初始条件	41
4.3.3 源汇项特征输入	42
4.4 模型的识别率定与验证	43
4.4.1 模型的率定	43
4.4.2 模型的验证	46
4.5 本章小结	48
第 5 章 石河子灌区地下水适宜水位控制技术研究	50
5.1 地下水位调控必要性	50
5.2 石河子灌区地下水适宜水位的确定	51
5.2.1 地下水位调控目标与原则	51
5.2.2 适宜地下水埋深	52
5.3 石河子灌区适宜地下水位调控方案	53
5.3.1 基于评价价值的石河子灌区地下水位调控	53
5.3.2 基于评价价值的调控方案设计	57
5.4 石河子灌区适宜控制地下水位调控预测结果分析	58
5.4.1 维持现状条件（情景 X）下地下水位变化趋势结果与分析	58
5.4.2 限采条件（情景 Y）下调控后地下水位变化趋势结果与分析	59
5.4.3 不同地下水调控方案下地下水位变化对比分析	61
5.5 本章小结	62
第 6 章 结论与展望	64
6.1 主要结论	64

6.2 展望.....	65
参考文献.....	66
致谢.....	71
作者简介.....	72
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表.....	73

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

地下水作为最主要的水体之一，和人类社会发展及生产生活有着密切联系^[1]。地下水以稳定性成为农业、工业和生活用水的重要水源，是社会生活重要的水资源^[2]。但地下水利用的不当也会对人们日常生活和自然环境带来了一定的影响，例如土壤盐渍化、使农业减产、含水层疏干等。因此，通过地下水位调控的地下水含水层管理方式，将区域的地下水位控制在合理的范围内，是确保区域社会经济和生态环境持续健康发展的客观需要^[3]。区域的水文地质可通过地下水位状态来反映^[4]，地下水位状态也是判断地下水环境问题的重要指标之一。地下水位调控是地下水含水层系统管理方式之一，地下水位评价是地下水取水总量控制指标确定的重要科学依据^[5]。最优地下水埋深可保障合理开采地下水和生态环境维系，对于促进农业生产及用水效益具有重要意义。

新疆位于亚欧大陆中部，山盆系统结构，属典型大陆性干旱气候，水资源时空分布不均匀^[6]，生态环境脆弱。玛纳斯河流域从南向北依次划分为高山-平原-荒漠区^[7]。南部高山区是水源地，高海拔的积雪覆盖是流域内河流和地下水的重要补给来源。石河子灌区为典型的山盆系统结构，气候条件干燥，冬季长而寒冷，夏季短而炎热，是玛纳斯河流域重要的绿洲农耕区。石河子市近年年均地下水开采量为 $13670 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ，远大于同期地表水引水量 $6663 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ，部分集中开采区域为地下水严重超采区^[8]。2012 年以来，石河子灌区逐步实施最严格的水资源管理制度，实施地下水限采措施后部分地区地下水位回升，出现地下建筑设施被淹及土壤次生盐渍化问题。按照要求继续落实最严格水资源管理制度，地下水如何合理使用成为区域发展亟待解决的科学问题。

基于此，本研究针对石河子灌区地下水可持续利用科学问题，在分析灌区水文地质环境条件基础上，采用常规数理统计法和 ArcGIS 空间分析技术分析灌区地下水位动态变化特征，通过灰色关联度与通径分析对灌区地下水位变化敏感性分析，分析灌区地下水位变化主要因素；基于 Visual MODFLOW 建立石河子灌区三维水文地质数值模拟模型，并对模型进行参数率定与验证，结合用水总量控制条件下地下水位模拟预测结果确定灌区最优地下水调控方案，为区域地下水水资源合理配置提供基础依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地下水开发利用分析研究现状

地下水资源具有多种特性，是水循环体系中重要的环节^[9]。大部分地下水资源实际无法全面投入到现代水循环体系中^[10]。在开发利用地下水应同时注重地下水资源保护，确保区域地下水资源环境的平衡^[11]。

国外对于地下水的开发利用研究有很多。半无限无侧限裂隙条状含水层系统普遍存在于冲积平原边缘，但在水文地质界却很少受到关注。Sedghi Mohammad M.研究了过渡区水力参数对含水层系统水力参数敏感性时空变化的影响，并讨论了过渡区对落差空间分布的影响^[12]。研究了内井条件对无量纲降深和边界耗尽体积变化的影响可用于评价含水层系统水头分布，计算裂隙附近冲积含水层的水量收支，分析过渡带对含水层系统水头及流量分布的影响。在确定大型灌溉方案水量平衡的同时，应对地下水抽采量估算的复杂性和不确定性仍然是一个挑战，估算抽象性对于保证地表和地下水资源的妥善管理至关重要；地球信息学是另一种新兴的抽象概念估计方法，然而，利用卫星遥感影像表征抽象概念存在一些复杂性和不确定性，导致最终结果不准确。Ali Nawaz Rana 等在巴基斯坦印度河流域下巴里多巴运河指挥区开展了地下水原位测量，以校准和验证基于地理信息方法估算的地下水提取，并指出巴里多巴运河指挥区地下水抽象化的不公平性要求政策制定者立即介入可持续地下水管理^[13]。Karunakalage Anuradha 等人借助降尺度重力恢复与气候实验球谐和喷气推进实验室区域解数据，估计古吉拉特邦梅萨纳地区的地下水限制，并表明统计回归能够成功地降低 GRACE SH 解的规模，适用于水管理规模研究^[14]。Matsuura Takuya 等人对库尔贝河流域地下水和河水进行了长期水温和电导率观测，明确了地下水资源安全利用的补给区域和补给情况^[15]。地下水热泵系统使地下水作为一种有前途的可再生能源能够开采附加值，为寻求可持续地下水热泵系统的最优安装和运行策略，Park Dongkyu 等人提出了一种模拟-优化方法，以性能和效率最大化、运行稳定、符合注水法规、成本和环境影响最小化为目标，将地下水流动与传热模拟模型与遗传算法联系起来作为优化技术，特别是该模型可以共同或分开确定最优井位和抽注量，并提出对于给定的流量，同时优化井位和流量可以提供比只优化井位更好的设计^[16]。

国内关于地下水的开发利用研究的历史由来已久，相对的有关研究有很多。赵发华等人探讨并分析了民乐县童子坝河灌区在水资源利用中所面临的问题，及其在节水灌溉和地下水资源利用方面的重点工程对策，给出了地下水资源利用的指导意见，并论述了中国节水灌溉科技的新发展方向^[17]。评估地下水水质状况、对未来水体、土壤微生物污染现状和趋势做出预估，并总结当前地下水资源利用所面临的主要问题，探

讨水体超标与污染的成因，并提供有关地下水资源环境保护、水体改良等的政策意见^[18]。李海涛等选择雄安新区，研究分析得到雄安新区地下水可开采潜力约为 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，其中，浅层地下水可开采潜力约为 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，深层地下水可开采潜力约为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[19]。赵良杰阐述了评价的精度以及水利工程对地下水循环的影响。指出水利工程的修建以及水库对水资源调蓄和分配给地下水资源评价带来一定困难，以期为地下水开发利用与治理保护服务^[20]。周志芳通过分析含水层系统的组成特点、含水层和弱透水层的释水特征，揭示了地下水资源的永久性消耗机理^[21]。刘琼基于自然-社会经济系统的承载协调理论，定义了地下水资源承载能力的内涵。综合承载本底、承载状态评价结果，确定区域地下水资源承载能力^[22]。杨丽芝提出采取农业节水、工业调整开采强度布局等举措，修复和涵养华北平原地下水系统势在必行^[23]。高萌萌指出地下水资源分区是评价地下水资源承载本底的重要基础工作^[24]。龚建师分析了淮河流域地下水资源量、影响因素及可持续开发利用潜力^[25]。贾建伟提出合理的地下水资源特征分析及开采潜力评估是科学管理和维护地下水资源系统稳定的重要前提^[26]。

人们对地下水的开采利用研究众多，目前国内外的研究重点在流域水循环、水化学环境等问题，为保护水环境提出了地下水位控制研究。

1.2.2 地下水数值模拟研究现状

实际的水文地质条件复杂，人们对地下水系统的认知有一定的局限性^[27]，然而在当今社会的飞速发展尤其是计算机相关技术的快速发展，使得地下水软件逐步成为当前社会研究地下水相关方面的重要手段^[28]。有关地下水模拟的软件像是 MODFLOW、Visual MODFLOW、GMS、FEFLOW 等，数值模拟逐渐发展，从基本的水量分析到现在的溶质运移等问题研究^[29]。

国外专家在利用数值模拟技术在地下水相关方面的研究相对较早。Das Sanjukta 首次能够在较少计算时间内具有较高精度，通过弱形式和强形式相结合的方法^[28]。Sikdar Pradip Kumar 等人通过水文地质模拟和实地数据来了解位于南孟加拉盆地复杂三角洲的两个特大城市加尔各答和豪拉及其周围的水文地质系统的过去、现在（2016 年）和未来（2030 年）的行为和污染物（废水、砷和重金属）的对流路径^[30]。Swetha K. 发展了局部径向点插值法（LRPIM），探究地下水流动问题^[31]。Hayford Michael Saah 提出了基于关联模拟优化的表征未知地下水污染源特征的方法，优化模型采用自适应模拟退火优化算法求解，该方法还应用于实际污染含水层中，以证明其潜在适用性和最佳表征结果^[11]。Bruno Zanon Engelbrecht 等人进行了对科伦特河流域乌鲁库亚含水层系统稳态的地下水流模拟，量化水量平衡，了解地下水流动态^[32]。

我国地下水数值模拟技术的研究始于 20 世纪 70 年代^[33]。宋倩玉以黑龙江省庆安县和平灌区为研究区，基于耗水均衡的地下水数值模拟模型，采用实测资料对模型进

行了验证与识别, 得到地下水资源在灌溉用水中的占比对灌区的耗水均衡状态影响显著, 随着地下水资源占比的增加的结论^[34]。陈孜研究哈密盆地绿洲带的地下水资源情况, 构建了区域三维地下水流模型, 在区域模型现状开采条件下, 模拟了 20 年后地下水位的降深情况, 并尝试通过优化开采布局的方法减缓绿洲带地下水降落漏斗的形成, 结果表明优化开采布局有一定的可行性^[35]。李学兰等人以大地电磁法为实现手段, 通过研究已知理想地质模型和多个基于反演结果解释得到的地质模型, 建立地下水数值模型^[36]。地下水数值模拟技术的发展已经相对成熟, 通过地下水数值模拟可以解决许多理论和实际问题。

1.2.3 地下水位调控技术研究现状

随着人口增长, 经济社会发展, 水资源供需矛盾越来越突出^[37]。对地下水调控的研究成为当下学者研究的重要内容, 地下水与环境息息相关^[38]。地下水位上升和持续下降都会给区域带来严重的环境地质问题^[39]。地下水位持续下降、上升对生态地质环境都有一定的负面影响, 研究适宜的地下水位成为维护人类生活和水环境和谐的重要方法之一^[40]。

国外对地下水位的研究, 像 M. Rinderer 等人利用地形湿度指数等地形指数预测平均地下水位的空间格局, 并对事件期间饱和区的动态进行模拟, 并指出地形指数对低渗透土壤集水区地下水位中值的预测是有用的, 当地下水位缓慢变化时, 地形湿度指数假设最好得到满足^[41]。Boran Ekin Aydin 等人提出了一种将溢油与软化约束联系起来的替代方式, 仍然保持了水系统的线性度。并指出在渠道控制问题中, 所提出的解决溢流水问题的方法易于实现, 水位在设定点附近的调节更为准确^[42]。Jerker Jarsjö 采用观测的初始条件和边界条件对温带气候区污染土壤进行了研究指出在未来二十年北欧可能出现的浅层地下水系统平均水位相对温和的上升^[43]。Ismail 等人为增进对印度尼西亚热带泥炭地水文的了解, 在试点现场, 对不同站位的水位和降水进行监测, 在岛上部分地区, 大规模的人工林排水导致了深的地下水埋深 (WTD) 和高的 WTD 衰退率; 在村庄周围, 农场尺度的排水影响较小, 衰退率较低, WTD 较浅, 通常低于 -0.4m , 是印度尼西亚泥炭地可持续管理的阈值^[44]。

在我国西北干旱、半干旱地区, 对于不合理开采地下水而引发的环境问题也有很多学者进行研究。袁长极确定了轻质土和黏土的地下水临界深度分别为 2.4m 和 1.2m 左右附近^[45]。王元华通过采用动态和静态水位相结合的方法进行试验得到水位指标和应用土壤水分能量测试技术取得了耐渍、耐旱土壤水分指标得到小麦的适宜地下水位控制指标及土壤水分指标^[46]。史入宇根据滹沱河流域垃圾填埋场和重要构筑物分布等情况, 采用综合评价方法确定地下水适宜水位上、下限划定的原则, 为石家庄地区南水北调实施前后地下水调控方案、地下水可持续开发利用提供理论依据^[47]。张院根据

北京西郊地区水文地质条件,通过砂石坑、地下建筑、垃圾填埋场调查进行工程与环境限制水位的研究,对比历史流场后确定 1983 年枯水期流场为地下水位恢复的适宜水位^[48]。闫金良通过对内蒙古河套灌区的适宜地下水位进行研究,加强地下水特别是微咸水在该灌区的应用研究^[49]。王敏以塔里木河下游为研究区,选取了不同林龄胡杨的径向生长量作为研究对象,以实现定量分析的目的,证明了胡杨不同林龄与地下水的关系不同,在开展恢复时应采取不同的对策^[50]。

确定地下水位的合理范围,现阶段大多数有关地下水位控制研究都主要揭示地下水与生态、地质环境问题之间的关系,提出对地下水位的控制研究有利于维持生态和地质环境的良性循环。

1.2.4 玛纳斯河流域地下水研究现状

玛纳斯河流域中的地下水作为水循环的重要环节,在生态和地质环境中扮演着不可替代的角色,研究地下水资源是保护区域生态环境工作中不可缺少的环节。李小龙等以玛纳斯河流域为研究区,研究了地下水位动态变化及水量平衡规律^[51]。史兴民以玛纳斯河流域为例,研究地貌和地下水的特点及其关系,得出地下水的类型、贮存和循环方式受地貌单元的控制这一结论^[52]。姜凌峰以新疆干旱区玛纳斯河流域莫索湾灌区 150 团为例,通过对比现状年与规划年节水灌溉情况及地下水模拟,得出的结果表明,由节水灌溉比例的增加对地下水位下降变化的贡献影响比例占 24.7%^[53]。杨广等采用 ^{18}O 稳定同位素技术,以玛纳斯河流域中的梭梭和怪柳为研究对象,探究了流域典型荒漠区植被地下水利用来源和贡献率^[54]。

就以上分析来看,对于玛纳斯河流域地下水研究较多,理论基础丰富,研究主要集中在地下水资源的分布、水质状况、水文地质特征和地下水动态变化等方面。研究表明,玛纳斯河流域地下水资源丰富,主要分布在河谷地带和山前平原地区。然而,由于长期的过度开采和不合理利用,地下水资源面临着严重的开发利用压力。针对这些问题,研究者们通过地下水监测网络、水文地质调查和数值模拟等手段,对玛纳斯河流域地下水进行系统研究和监测,也在开展地下水补给途径研究、地下水资源评价和保护、地下水污染防治等方面进行深入探讨,为玛纳斯河流域地下水资源的可持续利用提供科学依据。

1.3 研究内容及技术路线

本文以石河子灌区为研究区域,主要进行研究区的地下水位变化规律、影响因子及适宜控制水位研究,其主要研究内容如下:

- (1) 石河子灌区地下水位动态变化及水均衡分析