

土地利用变化影响下的地下水文响应监测与规律初探

邓松凯

新疆维吾尔自治区喀什水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6740

[摘要] 南疆地区作为典型的干旱内陆区,其水资源安全高度依赖于地下水。近年来,大规模的土地利用变化,尤其是农田扩张与生态输水工程,深刻改变了区域水循环过程,对地下水文系统产生了显著影响。本研究旨在探讨南疆地区土地利用变化驱动下的地下水文响应特征。通过梳理遥感监测、野外监测及数值模拟等多种技术手段,分析了耕地扩张、生态输水等典型土地利用/覆被变化对地下水位动态、水质及地下水-地表水转化关系的时空影响规律。结果表明,农业灌溉区地下水系统多呈负均衡,导致水位下降与水质咸化风险;而河道附近的生态输水则能有效补给地下水,促进水位抬升与生态恢复。研究初步揭示了人类活动主导的土地利用变化是南疆地下水文演变的关键驱动力,为区域水资源可持续管理与生态安全调控提供了科学依据。

[关键词] 土地利用变化; 地下水文响应; 监测技术; 南疆; 干旱区

中图分类号: S29 文献标识码: A

Monitoring and Preliminary Investigation of Groundwater Hydrological Response under the Influence of Land Use Change

Songkai Deng

Kashgar Hydrological Survey Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region

[Abstract] As a typical arid inland region, Southern Xinjiang heavily relies on groundwater for its water resource security. In recent years, large-scale land use changes, particularly farmland expansion and ecological water conveyance projects, have profoundly altered the regional water cycle processes and significantly impacted the groundwater hydrological system. This study aims to investigate the characteristics of groundwater hydrological responses driven by land use changes in Southern Xinjiang. By reviewing various technical approaches, including remote sensing monitoring, field monitoring, and numerical simulations, this paper analyzes the spatiotemporal patterns of impacts from typical land use/cover changes—such as cropland expansion and ecological water conveyance—on groundwater level dynamics, water quality, and surface water-groundwater interactions. The results indicate that groundwater systems in agricultural irrigation areas often exhibit negative water balance, leading to declining water levels and risks of water salinization. In contrast, ecological water conveyance near river channels can effectively recharge groundwater, promote water level recovery, and facilitate ecological restoration. This study preliminarily reveals that human activity-driven land use changes are a key driving force behind groundwater hydrological evolution in Southern Xinjiang, providing a scientific basis for sustainable regional water resource management and ecological security regulation.

[Key words] Land use change; Groundwater hydrological response; Monitoring technology; Southern Xinjiang; Arid region

引言

地下水是干旱区维系绿洲农业、居民生活及脆弱生态系统的命脉。南疆地区降水稀少,蒸发强烈,地表水资源时空分布极不均匀,使得地下水资源的地位尤为重要。多年来,在气候变化和强烈人类活动的双重影响下,南疆地区经历了土地利用/覆被

变化(Land Use/Cover Change, LUCC)。一方面,为满足粮食安全和经济发展需求,大规模的荒漠、草地被开垦为耕地,灌溉农业快速发展;另一方面,旨在修复退化生态系统的系列生态输水工程持续实施,改变了河道沿线的土地利用格局与水文过程。这些人类活动主导的土地利用变化,通过改变下垫面条件、水循环路

径及水源补给方式,直接或间接地影响着地下水文系统。例如,耕地扩张增加了灌溉入渗,也可能加剧地下水超采;生态输水则直接补充河道沿线地下水。然而,这种影响的时空规律、机制及生态效应十分复杂,且由于长期、系统的监测数据匮乏,在干旱沙漠地区对此仍知之甚少。因此,系统监测并初步揭示南疆地区土地利用变化影响下的地下水文响应规律,对于科学评估区域水资源承载力、优化水土资源配置、保障绿洲生态安全具有重大的理论与实践意义。

1 土地利用变化影响地下水文的关键机制

土地利用变化是指人类对土地自然属性的利用方式或管理目标发生长期性转变(如荒漠变农田、荒地变林地),以及由此引发的土地覆被物理状态(如植被类型、土壤裸露程度)的改变;地下水文响应则指上述变化通过影响下垫面的水文特性(如入渗、蒸发、径流),最终导致地下水系统在动态(水位、流速)、化学(水质)及储量等方面产生的可观测、可量化的系统性变化。总之,土地利用变化通过改变地表能量平衡、水分传输和物质循环,从多个界面驱动地下水文系统的演变,其核心机制在于对地下水“补给-径流-排泄”过程的再造。

1.1 “自然-人工”二元水循环结构的形成

在自然状态下,南疆荒漠区地下水主要依赖山前侧向径流补给和极少量降水入渗,排泄则以向荒漠腹地深部径流及天然植被蒸散为主,系统相对封闭稳定。大规模土地利用变化,特别是农业开发,打破了这一自然平衡,形成了强烈的“自然-人工”二元水循环结构。耕地取代天然植被后,人工灌溉取代天然降水成为土壤水和地下水的主要来源。渠系渗漏与田间灌溉下渗构成了新的、集中的补给项;同时,为了满足作物需水和防治盐渍化,大规模的地下水开采与人工排水工程成为主导的排泄方式。这一结构性转变使得地下水动态从受控于自然气候节律,转向受制于人类灌溉与开采活动的周期性调度。

1.2 水盐运移过程的加剧与异化

干旱区强烈的蒸发浓缩作用是原生盐渍化的自然背景。土地利用变化极大地加剧并异化了这一过程。农业灌溉将溶解盐分从水源地(河流、水库)输送至农田,在作物耗水和土面蒸发的双重作用下,盐分在土壤表层聚集。随后的灌溉或偶尔的降水事件,又将表层盐分淋滤至地下水,导致浅层地下水矿化度持续升高。此外,在绿洲边缘或深层含水层,因农业超采引起的地下水位持续下降,可能破坏原有的咸淡水界面动态平衡,诱发周边或深层咸水的侧向或越流入侵,造成次生咸化,其影响更为深远且难以逆转。

1.3 生态水文反馈机制的触发

与农业活动不同,生态输水代表了一种旨在修复系统的正向干预。向断流河道输水,首先通过河道渗漏对沿岸地下水进行直接的人工补给,迅速抬升局部地下水位。水位抬升为依赖地下水生存的旱生植被(如胡杨、怪柳)提供了复苏条件,从而驱动土地利用从裸地、沙地向天然林草地恢复。植被的恢复反过来通过冠层遮荫降低地表蒸发、通过根系吸收调节土壤水分,形成一

种积极的“地下水-植被”生态水文反馈环。然而,这一反馈存在阈值,地下水位过高可能导致无效蒸发增强和土壤盐渍化,过低则植被衰亡,其平衡点的确定是管理的关键。

2 地下水文响应监测的主要技术方法

2.1 南疆土地利用变化的典型特征

南疆的土地利用变化呈现鲜明的“绿洲扩张-荒漠化对峙-局部修复”格局。以塔里木河干流上中游为例,过去几十年间,耕地面积显著增加,大量挤占了草地与未利用土地。这种扩张主要依赖于抽取地下水与引河水灌溉,形成了连片的集约农业区。与此同时,下游由于长期断流,天然绿洲萎缩,土地沙化严重。2000年后启动的生态输水工程,则在下游河道沿线形成了一条狭长的“生态恢复走廊”,土地利用类型发生逆向转变。这种空间分异的格局为研究不同类型人类活动的水文效应提供了天然对比场。

2.2 综合监测技术体系的构建与应用

准确监测地下水文响应是揭示规律的基础。针对南疆地域广阔、环境恶劣的特点,目前已形成“空-天-地”一体化的综合监测技术体系。

2.2.1 遥感与地理信息系统技术

遥感技术可实现大范围、周期性的土地利用分类和地下水间接监测。

(1)土地利用/覆被变化监测。利用Landsat、Sentinel等系列卫星影像,通过监督分类等方法,能够精确解译不同时期的耕地、草地、荒漠、水域等土地利用类型,定量分析其时空转化规律。这是关联水文响应与驱动因子的前提。(2)植被与水文状况间接反演:归一化植被指数(NDVI)可有效指示植被生长状况和覆盖度,其变化与地下水位埋深存在显著相关性(例如在沙漠地区NDVI与地下水位埋深呈负相关)。此外,通过热红外遥感可反演地表温度、干旱指数等,间接推断土壤水分和地下水胁迫状况。

2.2.2 地面水文地质监测网络

地面水文地质监测网络是获取地下水动态直接数据的最可靠手段。

(1)地下水动态监测网。通过布设地下水监测井,定期人工或自动采集地下水位、水温、水质(电导率、主要离子等)数据。例如,铁门关市已建成包含上百个地下水监测点的综合监测网,实现了对地下水质量及其变化的定期跟踪。长期序列的监测数据是分析趋势、验证模型的关键。(2)同位素与水化学示踪。测定地下水、地表水中稳定同位素(δD , $\delta^{18}O$)和水化学组分,可以有效示踪不同水源的混合比例、循环路径和滞留时间。研究通过对比灌区与非灌区地下水同位素与水化学特征,清晰解析了农业活动对地下水补给来源和水质的影响。

2.2.3 数值模拟与大数据分析

在监测数据基础上,数值模型是模拟过去、预测未来、揭示机理的强大工具。

(1)地下水数值模型:利用如Visual MODFLOW等专业软件,

构建研究区地下水流动数值模型。通过校正水文地质参数,可以模拟不同土地利用情景下地下水的流动规律、水位变化及均衡状态。例如,对塔里木河干流的模拟能良好反映地表水与地下水的转化关系。(2)重力卫星与大尺度分析:GRACE卫星重力数据能够反演大区域尺度的地下水储量变化趋势,弥补地面点状监测的不足。研究表明,基于GRACE和GLDAS数据,可以揭示塔里木河流域地下水储量的时空演变规律,识别不同子区域的亏损与恢复态势。

3 南疆地区地下水文响应的主要规律

3.1 地下水水位动态响应的空间分异规律

地下水位的响应在空间上表现出鲜明的“三元”分异格局,与土地利用类型和人类活动强度紧密相关:

(1)绿洲灌溉农业区——持续下降的负均衡区。在耕地密集的绿洲内部,尽管灌溉入渗带来一定补给,但农业开采量远大于补给量,地下水系统长期处于负均衡状态,导致地下水位持续下降。水位下降速率和幅度受灌溉方式、节水程度和开采强度控制。(2)河道生态输水影响区——周期性抬升的正均衡区。在塔里木河等主要河道沿线,生态输水事件直接导致地下水位的快速抬升,形成以河道为轴线的带状响应区。水位抬升幅度随距河道距离增加而衰减,响应时间也存在滞后。该区域水位动态呈现与输水周期相关的波动性正均衡。(3)外围荒漠自然区——相对稳定的动态平衡区。在远离人类活动的广袤荒漠区,地下水主要接受山区侧向径流补给和极少量的降水入渗,系统基本处于自然的动态平衡状态,水位变幅较小。

3.2 地下水水质响应的咸化风险规律

土地利用变化,特别是农业活动,对地下水水质的影响日益凸显,咸化是主要风险。

(1)灌溉驱动盐分淋溶与浓缩。干旱区灌溉农业的发展,使得大量盐分随灌溉水进入土壤-地下水系统。强烈的蒸发作用导致浅层地下水浓缩,电导率升高。研究表明,非灌区浅层地下水的电导率可能反而高于灌区,反映了原生盐碱背景和现代灌溉活动的复杂叠加效应。(2)水位下降诱发咸水入侵。在绿洲边缘或深层含水层,过度开采导致淡水水位下降,可能打破原有的咸-淡水界面平衡,诱发深层咸水或周边咸水向上或侧向入侵淡水层,进一步恶化水质。

3.3 地表水-地下水转化关系的演变规律

土地利用变化深刻改变了“四水”(降水、地表水、土壤水、地下水)转化关系。

(1)转化方向与强度的改变。在天然状态下,荒漠区地表水与地下水转化微弱。耕地扩张后,通过灌溉系统,地表水被大量人为引导转化为土壤水并下渗补给地下水,同时地下水又被大量提取用于灌溉,形成了高强度的人工转化循环。在塔里木河干流,这种转化关系在不同时期表现为正均衡或负均衡,与耕地面积和来水量直接相关。(2)生态水文效应的滞后与联动。生态输水通过抬升地下水位,促进植被恢复,而植被恢复又通过蒸腾消

耗地下水,形成一个具有滞后性的反馈回路。研究发现,胡杨等关键物种的生态学特征参数与地下水埋深密切相关,埋深增加会导致幼苗密度、植被盖度下降。这表明地下水文响应最终会传递至生态系统,产生连锁效应。

4 对水资源管理的启示

上述规律表明,在南疆这样一个以人类活动为主导的脆弱地区,土地利用规划实质上等同于水资源规划。当前的地下水文响应,很大程度上是过去几十年土地利用决策的水文后果。这对区域水资源可持续管理提出了明确启示:首先,必须实施以水定地的根本原则,将地下水资源的可持续开采量作为耕地扩张规模的刚性约束。其次,需优化土地利用结构,在绿洲内部调整农业种植结构,推广节水灌溉技术以减少无效蒸散;在绿洲-荒漠过渡带保护和恢复天然植被,发挥其生态水文调节功能。再次,应完善一体化监测体系,继续加强并整合地下水动态、水质和生态监测网络,耦合遥感与模型技术,提升对地下水文响应实时评估和预测预警的能力。最后,要创新调控模式,探索地表水与地下水、农业用水与生态用水的联合调度策略,例如利用生态输水期进行地下水人工补给,在平枯水年则严格限采,通过主动调控实现水资源利用与生态保护的双赢。

5 结论

本研究初步探讨了南疆地区土地利用变化影响下的地下水文响应监测与规律。主要结论如下:

(1)农业扩张与生态输水是驱动南疆地下水文变化的两类核心人类活动,其通过改变补给、排泄和水盐运移过程产生影响。(2)综合运用遥感、地面监测网和数值模拟等技术,能够有效监测和揭示这种响应的时空格局。监测表明,地下水位动态呈现绿洲区下降、河道区抬升、荒漠区稳定的三元分异规律。(3)土地利用变化不仅引起水位波动,还加剧了地下水咸化风险,并根本性地改变了地表水-地下水的转化关系与生态水文过程。(4)未来的水资源管理必须坚持“以水定地”,强化监测预警,通过优化土地利用结构和创新水循环调控模式,实现南疆地下水资源的可持续利用与绿洲生态系统的长期稳定。

本研究仅为初步探讨,许多深层次机制,如不同土地利用类型的水文参数量化、气候变化与人类活动的耦合效应、生态水文阈值的确定等,仍需未来更为深入和长期的研究。

[参考文献]

- [1]陈丹红,曾献奎.基于GRACE和GLDAS的塔里木河流域地下水储量演变规律研究[J].高校地质学报,2022,28(6):894-901.
- [2]刘名.土地利用变化下塔里木河干流地表水与地下水转化及其生态效应研究[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [3]塔里木河下游生态输水效应[J].中国沙漠,2023,43(4):11.

作者简介:

邓松凯(1996--),男,汉族,河南商丘人,大学本科,助理工程师,研究方向为水文。