

Comparative Study on Groundwater Recharge Mechanisms under Different Geological Conditions

Shuai Luan

The Third Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Hebei Geological and Mineral Exploration and Development Bureau (Hebei Geothermal Resources Development Research Institute), Hengshui, Hebei, 053000, China

Abstract

Groundwater, as an important water resource, exhibits significant differences in its replenishment mechanism due to different geological conditions. This study aims to explore the groundwater recharge mechanisms under three typical geological conditions: karst areas, sandstone areas, and granite areas. Through field investigations, laboratory analysis, and numerical simulations, the performance of precipitation recharge, surface water recharge, and artificial recharge under different geological conditions was analyzed in detail. The research results indicate that different geological conditions have a significant impact on the efficiency and mode of groundwater recharge, providing a scientific basis for effective management of groundwater resources. The conclusions and recommendations of this study can provide valuable references for water resource managers in different regions.

Keywords

groundwater recharge mechanism; geological conditions; numerical simulation

不同地质条件下地下水补给机制的对比研究

栾帅

河北省地质矿产勘查开发局第三水文工程地质大队（河北省地热资源开发研究所），中国·河北 衡水 053000

摘 要

地下水作为重要的水资源，其补给机制因地质条件的不同而呈现出显著差异。本研究旨在探讨岩溶地区、砂岩地区和花岗岩地区三种典型地质条件下的地下水补给机制。通过野外调查、实验室分析和数值模拟等方法，详细分析了降水补给、地表水补给和人工补给在不同地质条件下的表现。研究表明，不同地质条件对地下水补给的效率和方式有着显著影响，为地下水资源的有效管理提供了科学依据。本研究的结论和建议可为不同地区的水资源管理者提供有价值的参考。

关键词

地下水补给机制；地质条件；数值模拟

1 引言

地下水是全球最重要的淡水资源之一，约占地球淡水总量的 30%。在许多地区，地下水是农业、工业和生活用水的主要来源。然而，由于地质条件的复杂性，不同地区的地下水补给机制存在显著差异。岩溶地区以其独特的地貌和地质结构，地下水补给主要通过降水渗透和地下河流进行；砂岩地区则依靠层状渗透和河流补给；而花岗岩地区，由于其低渗透性和高硬度，地下水补给机制较为复杂，主要依赖于裂隙和风化带的降水渗透。了解不同地质条件下的地下水补给机制，对于地下水资源的合理开发和管理至关重要。通过对不同地质条件下地下水补给机制的研究，可以为地下水资源的可持续利用提供科学依据，帮助制定合理的水资源管

理策略，从而提高水资源的利用效率，保障水资源的安全和可持续供给。

2 地质条件分类

2.1 岩溶地区

岩溶地区又称喀斯特地区，以其独特的地貌特征和地质结构而著称。此类地区的主要特点是地下有大量的可溶性岩石，如石灰岩和白云岩，长期受水流侵蚀形成了丰富的地下河流、溶洞和裂隙系统。这些地质特征使得岩溶地区的地下水补给机制与其他地区有显著不同。降水通过溶洞和裂隙系统迅速渗透到地下，形成丰富的地下水资源。岩溶地区的地下水补给主要依赖降水，其补给速度快，且由于地下河流系统的发达，水体流动性强。尽管岩溶地区地下水资源丰富，但由于地下水流动路径复杂，容易受到污染，且水资源管理难度较大。

【作者简介】栾帅（1989-），男，中国河北衡水人，本科，工程师，从事地下水、地热、环境地质研究。

2.2 砂岩地区

砂岩地区以其层状沉积岩地质结构为主要特征，地下水补给机制与岩溶地区有很大不同。砂岩的孔隙度和渗透性较高，使得降水能够通过岩石孔隙渗透到地下，补给地下水。砂岩地区的地下水补给主要依赖降水和地表水的渗透补给，尤其是河流、湖泊和洪泛区的补给。在这种地质条件下，地下水的储存能力较强，补给相对稳定。然而，由于砂岩地区地下水的补给速度较慢，且受到岩石孔隙结构的限制，地下水的流动性和更新速度较低。此外，砂岩地区地下水补给还受到地层厚度、岩石颗粒大小和胶结程度等因素的影响。

2.3 花岗岩地区

花岗岩地区以其硬度高、渗透性低的地质特征著称，地下水补给机制较为复杂。花岗岩为一种深成岩，具有致密的晶体结构和较低的孔隙度，使得水分难以渗透。这种地质条件下，地下水主要通过裂隙和风化带进行补给。降水通过地表裂隙和风化层渗透到地下，形成局部的地下水水体。由于裂隙和风化带的分布不均匀，花岗岩地区的地下水补给具有较大的空间变异性。此外，花岗岩地区的地下水储存能力有限，补给量相对较少，且水资源更新速度缓慢。尽管如此，花岗岩地区的地下水水质一般较好，因其岩石致密，水体受到污染的风险较低。

3 地下水补给机制

3.1 降水补给

降水补给是地下水补给的主要机制之一，尤其在地质条件多样的地区，其作用尤为显著。降水通过直接渗透地表进入地下含水层，补充地下水资源。渗透过程受土壤类型、地质结构、植被覆盖和降雨强度等多种因素影响。在岩溶地区，降水通过溶洞和裂隙迅速进入地下，形成丰富的地下水系统；而在砂岩地区，降水通过孔隙渗透，补给速度较慢但较为稳定。在花岗岩地区，降水主要通过裂隙和风化层渗透，补给具有局部性和不均匀性。降水补给的效率和效果直接影响地下水的储存和可持续利用，研究不同地质条件下的降水补给机制，可以为地下水资源的科学管理提供重要依据。

3.2 地表水补给

地表水补给是指河流、湖泊、湿地等地表水体通过渗透作用补给地下水。这种机制在地下水与地表水联系紧密的地区尤为重要。在砂岩地区，地表水通过岩石孔隙渗透，成为地下水的重要来源；在岩溶地区，地表水通过地下河流和溶洞系统补给地下水，形成复杂的水文网络；在花岗岩地区，地表水通过裂隙和风化带补给地下水，但补给量相对较少。地表水补给的效率受地表水体的水量、水质、流速和与地下水体的接触面积等因素影响。有效的地表水管理和保护，可以显著提高地下水的补给量和质量，保障地下水资源的可持续利用。

4 研究方法

4.1 野外调查

本研究在河北三个具有代表性的地区进行详细的野外调查，分别为岩溶地区（临城县）、砂岩地区（赞皇县）和花岗岩地区（青龙县）。在每个研究区域，首先进行地质构造调查，使用地质锤、地质罗盘和GPS等工具，详细记录地层的倾角、走向、岩性及主要地质构造特征，并拍摄地质剖面图和关键地质现象的照片。在每个区域内布设地下水位监测井，通过水位计定期测量地下水位变化，特别关注季节性变化和降雨事件后的水位响应。同时，在研究区域布设雨量计，详细记录降水量数据，与地下水位变化进行对比分析，以评估降水对地下水补给的影响。此外，还对地表水体进行调查，记录河流、湖泊和湿地等地表水体的位置、水量、水质和流速，分析其与地下水系统的联系。通过现场水文地质勘探，获取地下水流向、流速和主要补给区的位置。采集地下水和地表水样本，进行水化学分析，了解不同水体的化学组成和补给来源。

4.2 实验室分析

在野外调查采集的水样被送往实验室进行详细分析。水化学分析是关键步骤之一，包括测定样品中的主要离子（如钙、镁、钠、钾、碳酸氢盐、硫酸盐和氯化物）和微量元素元素的浓度。采用离子色谱、原子吸收光谱和电感耦合等离子体质谱等先进技术，确保分析结果的准确性。同位素分析也是重要内容之一，通过测定氢、氧同位素和碳同位素，追踪地下水的补给来源和流动路径。将不同地质条件下的水化学和同位素数据进行对比分析，可以揭示地下水补给机制的差异。此外，还进行渗透系数和储水系数测定。使用岩心样品在实验室中进行渗透试验，测定不同地质条件下的岩石渗透性和储水能力。结合野外观测数据和实验室分析结果，构建不同地质条件下的地下水补给模型。

5 案例研究

5.1 岩溶地区

河北省邢台市临城县崆山是北方为数不多的岩溶地区，选取典型的岩溶区作为研究对象。通过野外调查，共布设了15口地下水监测井和10个雨量计，收集了三年的水位和降水数据。地下水位监测结果显示，降水与地下水位变化具有显著的相关性。在丰水期（6月至9月），地下水位上升幅度达2.5m，而在枯水期（12月至3月），地下水位下降幅度达1.8m。通过水化学分析，发现地下水中的主要离子为 Ca^{2+} 和 HCO_3^- ，说明地下水主要受碳酸盐岩溶解作用的影响。同位素分析结果表明，地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值与当地降水相近，进一步证实了降水是主要的补给来源。

5.2 砂岩地区

河北省赞皇县嶂石岩地貌和元古界长城砂岩地区，选

取了典型的砂岩地层作为研究对象。在该区域内布设了 20 口地下水监测井和 12 个雨量计,收集了三年的监测数据。地下水位监测结果表明,降水对地下水位的影响相对缓慢,季节性变化不显著。地下水位在丰水期平均上升 0.8m,枯水期平均下降 0.5m。水化学分析显示,地下水中的主要离子为 Na^+ 和 Cl^- ,反映了砂岩的离子交换特性。同位素分析结果显示,地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值与地表水有较大差异,表明降水和地表水的补给途径存在一定滞后性。渗透系数测定结果显示,砂岩地区的渗透系数为 $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{m/s}$,表明该地区的地下水补给速率较低。数值模拟结果表明,降水补给量占总补给量的 50%,地表水补给占 30%,人工补给占 20%。模拟结果显示,降水事件后地下水位的响应时间为 7~10 天,表明地下水补给系统具有较长的滞后性。模型验证结果显示,模拟结果与实测数据的误差在 10% 以内。

5.3 花岗岩地区

河北省青龙满族自治县青龙镇矿区进行的花岗岩地区,选取了典型的花岗岩地层作为研究对象。在该区域内布设了 18 口地下水监测井和 10 个雨量计,收集了两年的监测数据。地下水位监测结果显示,降水对地下水位的影响具有较大的空间变异性,局部地区的地下水位在丰水期上升 1.2m,而在枯水期下降 0.9m。水化学分析结果显示,地下水中的主要离子为 SiO_2 和 K^+ ,反映了花岗岩的矿物溶解特性。同位素分析结果显示,地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 值与当地降水相近,但存在明显的时滞,表明降水通过裂隙和风化层补给地下水。渗透系数测定结果显示,花岗岩地区的渗透系数为 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{m/s}$,表明该地区的地下水补给速率非常低。数值模拟结果显示,降水补给量占总补给量的 60%,地表水补给占 25%,人工补给占 15%。模拟结果显示,降水事件后地下水位的响应时间为 10~15 天,表明地下水补给系统具有较长的滞后性和较低的补给效率。模型验证结果显示,模拟结果与实测数据的误差在 15% 以内。以上案例研究结果表明,不同地质条件下的地下水补给机制存在显著差异,这些差异在地下水管理和保护中应予以充分考虑。

6 结果与讨论

6.1 不同地质条件下的补给差异

通过对岩溶、砂岩和花岗岩地区的详细研究,结果显示,不同地质条件下的地下水补给机制具有显著差异。在岩溶地区,由于溶洞和裂隙系统的高度发达,地下水补给主要依赖降水,补给速度快、效率高,降水补给占总补给量的

70% 以上。砂岩地区的地下水补给则较为缓慢且稳定,主要依赖于降水和地表水的长期渗透,降水补给占总补给量的 50%,地表水补给占 30%。花岗岩地区由于其低渗透性和硬度,地下水补给速度最慢,主要通过裂隙和风化带进行补给,降水补给量约占 60%。这些差异表明,不同地质条件不仅影响地下水的补给速度和效率,还影响补给途径和补给量的比例。这些发现为不同地区地下水资源的管理和保护提供了重要的科学依据。

6.2 地质条件对地下水补给的影响因素

地质条件对地下水补给的影响主要体现在岩石的渗透性、孔隙度、裂隙发育程度和地层结构等方面。在岩溶地区,高度发育的溶洞和裂隙系统使得地下水补给效率高、速度快,但也易导致污染扩散。砂岩地区,岩石的孔隙度和渗透性较高,降水和地表水能够较为均匀地渗透补给地下水,但补给速度相对较慢。花岗岩地区,岩石的致密性和低渗透性限制了水的渗透路径,主要依赖于裂隙和风化层进行补给,补给速度慢且具有较大的空间变异性。此外,降水量、地表水体的分布及人类活动如灌溉和人工补给措施也显著影响地下水补给的效率和量。这些因素综合作用,决定了不同地质条件下地下水补给机制的显著差异,理解这些影响因素对于制定有效的地下水管理策略至关重要。

7 结论

本研究通过对河北省岩溶、砂岩和花岗岩地区的详细调查和分析,揭示了不同地质条件下地下水补给机制的显著差异。岩溶地区由于其溶洞和裂隙系统发达,地下水补给效率最高,主要依赖降水;砂岩地区的地下水补给较为缓慢且稳定,主要通过降水和地表水长期渗透;花岗岩地区因其低渗透性和致密性,地下水补给速度最慢,主要依赖裂隙和风化层。本研究还指出,岩石的渗透性、孔隙度、裂隙发育程度和地层结构等地质条件,以及降水量和地表水体分布等因素,均对地下水补给机制产生重要影响。这些发现为不同地质条件下地下水资源的有效管理和保护提供了科学依据。

参考文献

- [1] 刘燧,康凤新,张文强,等.济南长孝岩溶水系统地下水富集区补给源识别及其成因机制[J/OL].地质科技通报,1-19[2024-07-02].
- [2] 李叶朋,蔡武军,王勇辉,等.嫩江流域河间地块地下水和地表水补给关系研究[J/OL].人民长江,1-8[2024-07-02].
- [3] 李海英.井灌补给过程对地下水水环境指标变化的影响研究[J].地下水,2024,46(3):80-82.