

环境示踪剂(^3H 、 Cl)在干旱半干旱区地下水补给研究中的应用

马宝强^{1,2}, 王潇¹, 汤超¹

(1. 甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要:地下水补给资源估算是地下水资源可持续开发利用的重要依据,传统地下水资源评价工作往往是采取水均衡法或达西定律等评价地下水补给资源,很少采用环境示踪剂方法。环境示踪剂在地下水补给研究中具有重要价值,特别是在干旱半干旱地区是一种非常简单可靠的评价方法。本文介绍了两种常见的环境示踪剂(^3H 、 Cl)方法氡峰法和氯质量平衡法的基本原理及其在地下水补给研究中的主要应用,其中氯质量平衡法不仅可以估算地下水的补给量,而且可以研究植被覆盖变化对地下水补给影响和示踪地下水补给历史及气候变化。

关键词:地下水补给;环境示踪剂;氡峰法;氯质量平衡法

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **doi:** 10.12128/j.issn.1672-6979.2021.11.010

引文格式: 马宝强,王潇,汤超.环境示踪剂(^3H 、 Cl)在干旱半干旱区地下水补给研究中的应用[J].山东国土资源,2021,37(11):67-71. MA Baoqiang, WANG Xiao, TANG Chao. Application of Environmental Tracers (^3H 、 Cl) for Groundwater Recharge Research in Arid and Semi-arid Regions[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(11): 67-71.

0 引言

地下水是水资源的重要组成部分^[1]。地下水补给是指含水层或含水系统从外部获得水量的过程^[2]。补给不仅使地下水获得水量,而且使地下水的盐分和能量得到改变,表现为地下水的水位、流量、水化学组分和温度等物理化学指标发生变化^[3]。地下水补给研究是评价地下水资源多寡的关键工作,充足的补给量意味着更多可开发利用的地下水资源。对地下水补给资源与生态环境关系认识不清,盲目超采地下水资源,还会造成地表水体生态流量减少等生态环境恶化的风险^[4],而在干旱半干旱地区很多地下水开采都是不可持续的^[5],地下水开发利用和维持生态系统稳定的矛盾非常突出^[6],因此合理评价地下水补给资源确定允许开采量是地下水可持续开发利用的基础。通常大多数地下水的主要补给来源为大气降水^[3,7]。估算地下水补给量的

主要方法包括^[8-9]:同位素法、氯离子质量平衡法、水均衡法、达西定律法和包气带数值模拟法等。在干旱半干旱地区,由于降水量有限,因此通常很难用常规方法准确估算降水对地下水的补给量。全球有很多干旱半干旱地区开展过地下水补给研究^[5],估算得到地下水平均补给率在0.2~35 mm/a之间,仅占多年平均降水量的0.1%~5%,补给量非常有限。本研究主要介绍氡峰法和氯质量平衡法在估算大气降水对地下水补给方面的主要应用及其基本原理,这两种方法都普遍用于干旱半干旱地区的地下水补给研究,对于准确评价干旱半干旱地区地下水补给资源具有重要作用。此外,应用氯质量平衡法还可以研究植被覆盖变化对地下水补给的影响和示踪地下水的补给历史及气候变化。

1 氡峰法

1950年以来,世界各地的核爆试验活动向大气

收稿日期:2021-01-15;修订日期:2021-04-18;编辑:王敏

基金项目:2019年度甘肃省地下水基础环境状况调查评估项目,国家自然科学基金项目(41672254)

作者简介:马宝强(1991—),男,宁夏固原人,助理工程师,主要研究方向为土壤与地下水的污染防治;E-mail: bqiangma@sina.com

中输入了大量人为形成的氡,到 1963 年达到了峰值(图 1),大气中的氡会随着降水进入到土壤与地下

水中。包气带是地球关键带主体,是大气降水、地表水、土壤水和地下水“四水”转化的活跃地带,在干

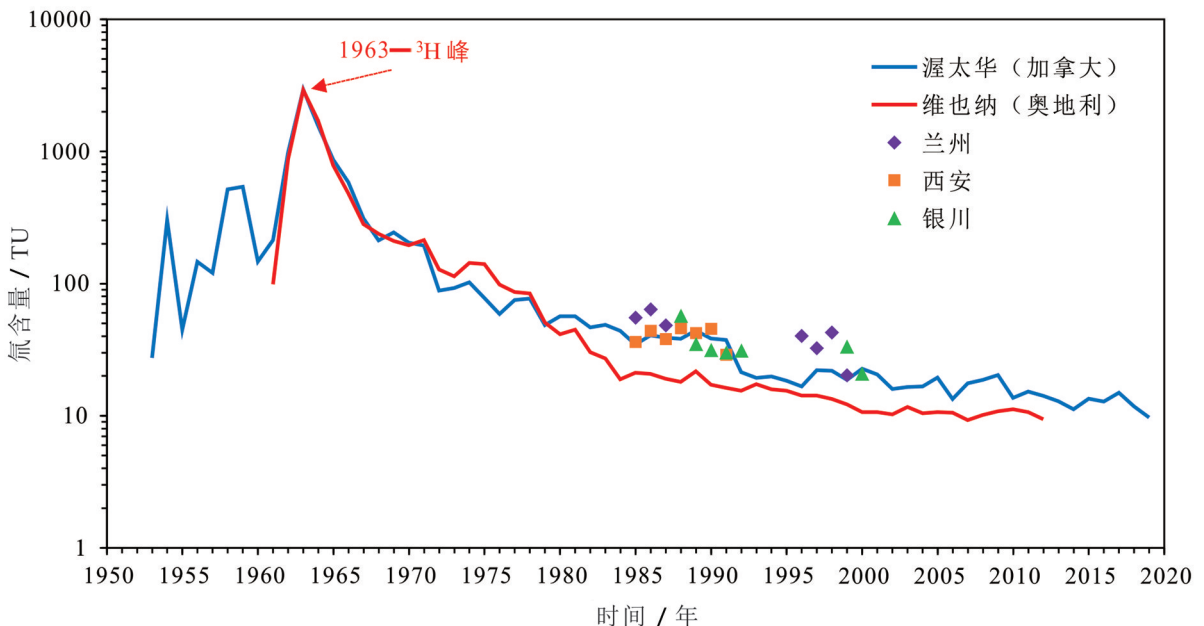


图 1 大气降水中氡含量的输入历史和衰减曲线^[11]

旱、半干旱的巨厚包气带地区,1963 年的核爆氡峰可能会仍然保存在包气带中,因此可以利用氡峰法估算地下水的补给量。然而,由于氡的半衰期短,全球大部分地区已经观测不到氡的峰值,因此氡峰法不再是研究地下水补给的理想方法,而且在降水入渗速率大和包气带厚度小的地区,包气带中的氡会很快进入地下水中,导致利用氡峰法计算得到的地下水补给量会偏大。不过在黄土地区,特别是在黄土高原地区,由于黄土塬包气带的厚度通常较大,通常在几十米至百余米,而且土壤水的入渗速率较低,入渗方式以活塞流主导,1963 年的核爆氡峰至今仍然保留在包气带中(图 2),因此可以利用氡峰法有效的估算地下水补给量。张之淦等^[10]早在 20 世纪 90 年代初期就发现山西省平定县黄土包气带中保存有明显的 1963 年的氡峰,其下渗深度在 6m 左右。李晗等^[11]在陕西省长武塬钻取了 3 个黄土包气带剖面,发现 3 个剖面的氡峰依然清晰保持在 6.6~8.2 m 的深度。黄天明等^[12]最新研究成果表明黄土高原上的最大黄土塬—董志塬包气带中 1963 年的氡峰仍然保存在 7.5 m 的位置,并以氡峰法推断降水对地下水的补给量为 39 mm/a。此外,还可以通过投放人工氡的示踪方法,定期观测氡峰的下移深度,估算地下水的补给量^[8]。李杰彪等^[13]采用人工氡示踪得到甘肃北山地区地下水的补给量仅为

2.56~6.57mm/a,表明该地区对储存高放废物比较有利。利用氡峰法估算地下水补给的计算方法如下:

$$R = \frac{1000 \times h \times \theta_v}{t - 1963} \quad (1)$$

式中: R 为补给量/(mm/a); h 为氡峰的深度/m; t 为采样时间/a; θ_v 为氡峰以上包气带剖面的平均体积含水量/%。

2 氯质量平衡法

2.1 估算地下水补给量

氯离子在水中的溶解度很高,会随着降水进入包气带和含水层中(图 2),是一种理想的环境示踪剂。在干旱半干旱地区,氯离子质量平衡法被认为是一种比较简单和准确估算地下水补给量的方法,因此被广泛应用于干旱半干旱地区地下水补给量的估算^[5]。该方法最早是 Eriksson 和 Khunakasem^[15]提出,Allison 和 Hughes^[16]在此基础上进一步提出了利用包气带剖面氯离子含量估算地下水补给量的氯质量平衡方法。1980 年,Edmunds 和 Walton^[17]对该方法进行了修正和完善,明确指出在以活塞流为主导的地下水补给机制和氯离子没有额外来源的条件下,氯质量平衡法可以有效地估算干

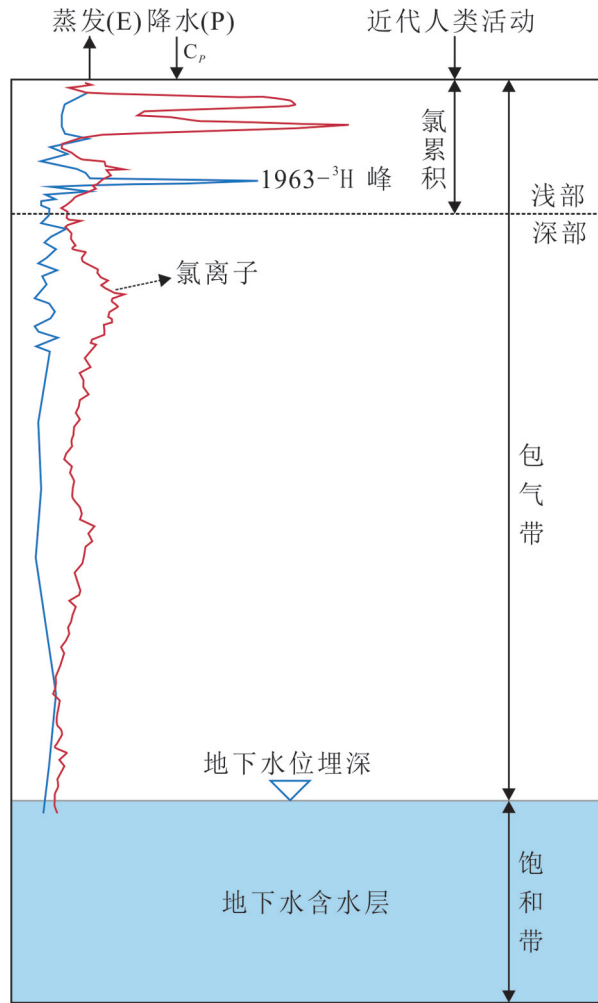


图 2 包气带剖面及浅部氯累积和 1963-³H 峰
(改自 Huang et al., 2019)

旱半干旱地区的地下水补给量。但是如果地表存在喜盐植物对氯离子有大量的吸附作用,则氯质量平衡法就不适于评价地下水的补给量^[18]。

黄天明等^[12]采用氯质量平衡法得到董志塬每年大气降水对地下水的补给量为 37~41mm/a,该结果与氙峰法得到的结果(39mm/a)基本接近,据此可以估算董志塬黄土潜水每年接受降水补给的资源量为 $(3.0\sim 3.2)\times 10^7\text{ m}^3/\text{a}$ 。马金珠等^[19]采用该方法得到巴丹吉林沙漠南部地区降水对地下水补给量为 1.3mm/a,仅占多年平均降水量的 1.5%,补给量非常有限,该结果与刘晓艳等^[20]在巴丹吉林沙漠东南部区域采用氯离子得到的补给量基本一致。

氯质量平衡法的应用主要基于以下假设:(1)巨厚包气带;(2)水在包气带中运移方式是一维活塞流;(3)补给水源为大气降水;(4)地表径流为零;(5)大气气沉降水稳定。大气降水中氯沉降和土壤表层以

下(包气带)的氯离子含量满足如下的方程式:

$$P = R + E \quad (2)$$

$$C_p \cdot P + D = R \cdot C_s + 0 \cdot E \quad (3)$$

$$R = \frac{C_p \cdot P + D}{C_s} \quad (4)$$

式中: P 为大气降水量/(mm/a); R 为地下水多年平均补给量/(mm/a); E 为地表的蒸散发量/(mm/a); C_p 为降水中的氯离子含量/(mg/L), $C_p \cdot P$ 为氯离子的湿沉降量; D 为氯离子的干沉降量; C_s 是包气带土壤水中的平均氯离子含量/(mg/L),由于近代人类活动导致氯离子在包气带浅部有一定累积(图 2),因此通常采用不受近代人类活动影响的包气带深部土壤水氯离子含量的加权平均值,计算公式如下:

$$C_s = \frac{\sum_{i=0}^n C_i \theta_{vi} Z}{\sum_{i=0}^n \theta_{vi} Z} \quad (5)$$

式中: C_i 为每个样品的氯离子含量/(mg/L); θ_{vi} 为每个样品的体积含水量(单位%), $\theta_{vi} = \rho_g \cdot \theta_g / \rho_w$, ρ_g , θ_g , ρ_w 分别为土壤干密度、重量含水量和水的密度); Z 为取样间隔/m, $n=0,1,2,\dots,n$,为样品编号。

2.2 研究植被覆盖变化对地下水补给的影响

影响地下水补给的因素有很多,主要包括人为因素和自然因素,在人类活动逐渐加剧的背景下,人为因素对地下水补给的影响越来越大,其中人工植树造林的增加或改变种植类型导致地下水补给量变化的研究有待加强。非洲尼日尔地区 1950—1998 年间,尽管 1970—1998 年的年均降雨量比 1950—1969 年减少了 23%,但是由于开垦种田,将大面积自然植被(灌草木)改变为人工种植的小米,反而导致区域地下水的补给量^[21]由 2mm/a 增加到了 25mm/a。植被覆盖变化,还会导致地下水补给量的减少。我国北方毛乌素沙漠地区规模化植树造林计划对裸露砂地进行植被恢复,会导致地下水补给率减少 33%~90%以上^[22],使地下水补给率明显降低。Owuor 等^[23]也研究表明裸露土地的植被恢复可将地下水补给率从 42%减少至 6%~12%,而将森林开垦为牧场会导致地下水补给率增加 $(7.8 \pm 12.6)\%$ 。从全球来看^[24],各种土地利用类型下地下水的补给率:农田(0.11)>草地(0.08)>林地(0.06)>灌木丛林地(0.05)。因此如何准确评估植被覆盖变化对地下水补给的影响,特别是干旱一半

干旱地区,对指导土地开发利用规划具有重要意义。氯质量平衡法被认为是一种可以较好估算干旱半干旱地区植被覆盖变化对地下水补给的影响,但使用必须符合一个前提条件:包气带剖面中的氯含量达到稳态。包气带中的高氯含量反映了低的补给率,而低氯含量反映了高的补给率。植被覆盖变化对地下水补给的影响可以采用下式计算^[25]:

$$\Delta = \frac{R_i - R_n}{R_i} = 1 - \frac{C_{Si}}{C_{Sn}} \quad (6)$$

式中: Δ 为植被覆盖变化引起地下水补给量的变化率/%; R_i 、 C_{Si} 分别为植被覆盖变化前地下水的补给量/(mm/a)和包气带土壤水的加权平均氯含量/(mg/L); R_n 、 C_{Sn} 为植被覆盖变化后地下水的补给量/(mm/a)和包气带土壤水的加权平均氯含量/(mg/L)。

2.3 研究地下水补给历史及气候变化

结合包气带土壤水的氯离子累积年龄和地下水接受降水的补给率变化,可以研究地下水的补给历史及气候变化。马金珠等^[19,26]采用包气带氯质量平衡法研究了巴丹吉林沙漠近 800 年以来古气候明显经历了 4 个干期(地下水补给率低)和 3 个湿期(地下水补给率高)。黄天明等^[27]采用相似方法揭示了鄂尔多斯西部干旱草原地区 2500 年以来的干旱化过程,表明地下水的补给量在不断减少。邓林等^[28]利用氯质量平衡法研究了陕北沙漠—黄土过渡带的地下水补给历史及气候变化,结果表明 1990 年以来,随着气温升高和降水减少,地下水的补给量在逐渐降低。包气带剖面任意某位置土壤水的累积年龄等于从地表到该位置的氯离子累积质量除以多年平均的氯离子输入量,即为氯离子累积年龄^[22,27]:

$$t = \frac{1}{C_p \cdot P} \int_0^z \theta_v(z) \cdot C_s(z) dz \quad (7)$$

式中: t 为包气带剖面任意位置土壤水的氯离子累积年龄/a; z 为包气带剖面的深度/m; θ_v 为包气带剖面样品的体积含水量/%。

3 结论

环境示踪剂在地下水补给研究中具有重要作用,本文介绍了两种常见环境示踪剂法氡峰法和氯离子质量平衡法的基本原理及其在地下水补给方面

的主要应用。这两种方法在干旱半干旱地区都是非常简单并且可靠的评价地下水补给资源的方法,二者应用的共同前提是地下水补给机制必须为活塞流。氡峰法主要是利用包气带中保存的 1950 年以来人类核爆试验活动产生的 1963 年氡峰信息,进而根据氡峰位置和入渗时间估算地下水的入渗速率和补给量。氯质量平衡法主要是利用包气带中的氯离子剖面信息,根据氯质量平衡原理估算地下水的补给量。此外,应用氯质量平衡法还可以研究植被覆盖变化对地下水补给的影响和地下水的补给历史及气候变化。

参考文献:

- [1] 杨海博,朱文峰,周良,等.肥城盆地区域地下水化学特征及水质评价[J].山东国土资源,2020,36(2):50-55.
- [2] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1985:1-5.
- [3] 周训,胡伏生,何江涛,等.地下水科学概论[M].北京:地质出版社,2009:1-5.
- [4] GRAAF I E M D, Gleeson T, Beek L P H, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. Nature, 2019, 574(7776):90-94.
- [5] SCANLON B R, Keese K E, Flint A L, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(15):3335-3370.
- [6] 王旭升,尹立河,方坤,等.鄂尔多斯浩勒报吉水源开采地下水的环境影响分析[J].水文地质工程地质,2019,46(2):5-12.
- [7] 陶志斌,于林弘,杨宁,等.烟台大沽夹河地下水水源地评价研究综述[J].山东国土资源,2019,35(2):24-31.
- [8] 汪丙国.地下水补给评价方法研究[D].北京:中国地质大学,2008:1-5.
- [9] 尹立河.基于多种方法的地下水补给研究[D].北京:中国地质大学,2011:1-5.
- [10] 张之淦,刘芳珍,张洪平,等.应用环境氡研究黄土包气带水分运移及入渗补给量[J].水文地质工程地质,1990(3):5-7.
- [11] 李哈,司炳成,靳静静,等.利用环境氡估测黄土高原坡地深层渗漏量[J].水土保持学报,2016,30(4):91-95.
- [12] HUANGT, Ma B, Pang Z, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers Evidence from multiple environmental tracers[J]. Journal of Hydrology, 2019, 583:1-11.
- [13] 李杰彪,苏锐,周志超,等.氡示踪法在北山地区地下水补给研究中的应用初探[J].世界核地质科学,2015,32(2):114-118.
- [14] GLOBAL network of isotopes in precipitation (GNIP) [EB/OL]. [2020-11-03]. http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html.
- [15] ENIKSSON E, Khunakasem V. Chloride concentration in

- groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel Coastal Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 1969, 7(2): 178 - 197.
- [16] ALISON G B, Hughes M W. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer[J]. *Soil Research*, 1978, 16: 181 - 195.
- [17] EDMUNDS W M, Walton N R G. A geochemical and isotopic approach to recharge evaluation in semi - arid zones[J]. In: *Arid Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques*, IAEA, Vienna, 1980: 47 - 68.
- [18] 陈植华, 徐恒力. 确定干旱半干旱地区降水入渗补给量的新方法—氯离子示踪法[J]. *地质科技情报*, 1996, 15(3): 88 - 93.
- [19] 马金珠, 李丁, 李相虎, 等. 巴丹吉林沙漠包气带 Cl - 示踪与气候记录研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 14 - 19.
- [20] 刘晓艳, 陈建生, 孙晓旭. 采用氯离子示踪法计算沙漠降雨入渗量[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 146 - 149.
- [21] FAVREAU G, Cappelaere B, Massuel S, et al. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 1 - 18.
- [22] HUANGT, Pang Z, Yang S, et al. Impact of Afforestation on Atmospheric Recharge to Groundwater in a Semiarid Area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 20(47): 1 - 19.
- [23] OWUOR S O, Butterbach - Bahl K, Guzha A C, et al. Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi - arid environments[J]. *Ecological Processes*, 2016, 5(1): 1 - 21.
- [24] KIM J H, Jackson R B. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(1): 120 - 128.
- [25] 庞忠和, 黄天明, 杨硕, 等. 包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 51 - 61.
- [26] 马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录[J]. *科学通报*, 2004, 49(1): 22 - 26.
- [27] HUANGT, Pang Z, Liu J, et al. Groundwater recharge in an arid grassland as indicated by soil chloride profile and multiple tracers[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(5): 1047 - 1057.
- [28] 邓林. 地下水补给历史及其对气候变化的响应[D]. 西安: 长安大学, 2011: 1 - 5.

Application of Environmental Tracers (^3H , Cl) for Groundwater Recharge Research in Arid and Semi - arid Regions

MA Baoqiang^{1,2}, WANG Xiao¹, TANG Chao¹

(1. Gansu Academy of Eco - environment Sciences, Gansu Lanzhou 730000; 2. College of Geoscience and Survey Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

Abstract: The estimation of groundwater recharge resources is an important basis for sustainable development and utilization of groundwater resources. Traditional groundwater resources evaluation work often uses water balance method or Darcy's law to evaluate groundwater recharge resources, and rarely uses environmental tracer methods. Environmental tracers have important value in groundwater recharge research, especially in arid and semi - arid areas, which is a very simple and reliable evaluation method. In this paper, basic principles of two common environmental tracer (^3H , Cl) methods have been introduced, they are tritium peak method and chlorine mass balance method, and their main applications in groundwater recharge research have been introduced as well. The chlorine mass balance method can not only estimate the amount of groundwater recharge, but also study the impact of vegetation cover changes on groundwater recharge and trace the groundwater recharge history and climate change.

Key words: Groundwater recharge; environmental tracers; tritium peak method; chlorine mass balance method