

人工示踪方法评价地下水入渗补给及其优先流程度 ——以河北栾城和衡水为例

吴庆华^{1,2)}, 张 薇²⁾, 蔺文静²⁾, 张发旺³⁾, 王贵玲^{2)*}

1)长江科学院, 湖北武汉 430010; 2)中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

3)中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004

摘 要: 利用传统人工示踪剂峰值方法评价地下水入渗补给存在精度低和适用性差等缺点。为此, 本文提出了多区模型方法, 采用保守型示踪剂溴和氚对河北栾城和衡水地区进行了不同土地利用方式和不同深度地下水入渗补给评价。结果表明, 栾城和衡水地区地下水入渗补给量分别为 124.3 mm/a 和 13.7 mm/a, 与传统方法(103.3 mm/a 和 0.0 mm/a)相比, 多区模型方法的评价结果更符合实际。同时对由优先流引起的地下水入渗补给量进行了分析, 栾城和衡水地区优先流程度分别为 28.7%和 2.3%。秸秆覆盖抑制降雨或灌溉水入渗补给地下水, 降低优先流程度, 而植被覆盖有利于土壤水优先流的形成。地下水入渗补给量及其优先流程度与示踪深度均无明显相关性, 且受土壤结构控制。

关键词: 人工示踪; 地下水补给; 多区模型; 优先流; 土地利用

中图分类号: P641.2; P641.8 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.04.12

The Estimation of Groundwater Recharge and Preferential Flow Based on the Applied Tracers: A Case Study of Luancheng and Hengshui Areas in Hebei Province

WU Qing-hua^{1,2)}, ZHANG Wei²⁾, LIN Wen-jing²⁾, ZHANG Fa-wang³⁾, WANG Gui-ling^{2)*}

1) Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010;

2) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061;

3) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: The traditional method of the applied tracer for estimating the groundwater recharge according to the peak of tracer's concentration in soil profile has encountered the problem of precision and application. Therefore, the multi-regions method was suggested in this paper to estimate the groundwater recharge using the applied tracers, i.e., bromide and tritium, on the conditions of different land utilizations and depths, in Luancheng and Hengshui areas of Hebei Province. The results showed that the groundwater recharges of Luancheng and Hengshui areas were 124.3 mm/a and 13.7 mm/a, respectively, and the percentages of preferential flow were 28.7% and 2.3%, respectively, which indicated that the results of the multi-regions method were more reasonable than the traditional method. Moreover, the straw mulch restrained the infiltration of precipitation or irrigation, and reduced the preferential flow. However, the plants, i.e., corn, wheat, and grass, improved the preferential flow. The groundwater recharge and preferential flow which were controlled by the soil structure showed no clear relationship with injected depths.

Key words: applied tracer; groundwater recharge; multi-region model; preferential flow; land utilization

本文由国家“973”计划项目(编号: 2010CB428802)、国家自然科学基金项目(编号: 51279016; 41372243)和国家“十二五”科技支撑计划项目(编号: 2011BAB10B04)联合资助。

收稿日期: 2013-07-31; 改回日期: 2013-10-01。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 吴庆华, 男, 1981 年生。博士, 工程师。主要从事土壤水盐运移研究。通讯地址: 430010, 湖北武汉市江岸区黄埔大道 23 号。E-mail: wqh0505@126.com。

*通讯作者: 王贵玲, 男, 1964 年生。研究员。主要从事地下水资源评价与地热地质研究。通讯地址: 050061, 河北石家庄中华北大街 268 号。E-mail: guilingw@163.com。

河北平原水资源缺乏,地下水为其主要水源。农业灌溉用水约占总淡水资源开发利用量的 72%,是造成目前该地区淡水资源供需矛盾不断恶化的主要原因(吴庆华, 2008)。从 1980 年以来,约 70% 的地区地下水不同程度被超采,引发了一系列的环境问题,如地下水位持续下降(下降速率为 0.5~2.0 m/a),降落漏斗形成与扩大(如石家庄、衡水和沧州等地区的降落漏斗),中东部咸淡水界面下移(衡水与沧州地区),东部沿海地区咸水入侵以及地面沉降(沧州)等(费宇红等, 2007)。尽管 90 年代国家政府意识到地下水过度开采带来的严重后果,且进行了一系列的节水措施,如滴灌、喷灌、秸秆与薄膜覆盖等,但上述问题没有得到根本性解决。这主要归因于经济社会发展对淡水资源需求的不断增加(Jin et al., 1999)。对地下水入渗补给评价方法不足会导致地下水资源的开发利用不合理,使该地区水资源供需矛盾更加激烈。土壤水入渗补给是该地区浅层含水层的重要补给源之一,其大小与时空变化规律是影响该地区水资源管理的重要组成部分。评价地下水入渗补给的方法主要有水均衡法(吴庆华等, 2012)、地中渗透仪法(Kitching et al., 1977; 雷志栋等, 1999)、零通量法(荆恩春等, 1994)、示踪法(Gates et al., 2008; Köhne et al., 2006; Lin et al., 2006; Wang et al., 2008)、数值模拟法(Lu et al., 2011; Šimůnek et al., 2008)和地下水位动态法(Healy et al., 2002)。每种方法都有其适用性,如水均衡法回避了土壤水的非均匀流,但蒸发蒸腾、土壤蒸发、作物截留以及植物体利用等均采用经验公式估算,其评价精度不高;环境氯离子示踪法仅适合于无人活动或能查明氯源地区,且假设土壤水为活塞流。虽然人工示踪方法对人类活动地区具有较好的适用性(Dassi, 2010; Ma et al., 2008),但其以活塞入渗理论为基础,对田间普遍存在优先流的现象难以适用。因此,本文根据田间土壤孔隙大小及其渗透性等特点以及人工示踪剂浓度分布模式提出了多区模型法。采用人工保守型示踪剂 NaBr 和高浓度氚对河北栾城和衡水研究区进行了不同土地利用方式下地下水入渗补给评价。同时定量评价了由优先流引起的地下水入渗补给量及其影响因素。

研究区位于河北平原栾城县和衡水市,见图 1。栾城研究区北纬 37°47'—38°01',东经 114°28'—114°47',面积 379 km²,属太行山东麓倾斜平原南部,由滹沱河冲积扇南缘、槐沙河洪积冲积扇北部及其扇间洼地组成。7 月份平均气温最高,约 26.4℃,1 月份最低气温-3.7℃,大于零度积温

4710℃。年均降雨量 450 mm/a (1990—2010 年),主要集中在 6—9 月份,占全年降雨量 80%以上。年均蒸发量 1470 mm/a (1990—2010 年)。主要作物为棉花、冬小麦和夏玉米,以地下水进行灌溉,灌溉方式以漫灌为主,部分地区采用喷灌等节水措施。地下水位埋深由 10 m(1975 年)持续增加到 37 m(2010 年)。地层岩性复杂,0—5 m 以粘土和粉质粘土为主,含薄层亚砂土;5.0 m 以下以粉细砂和

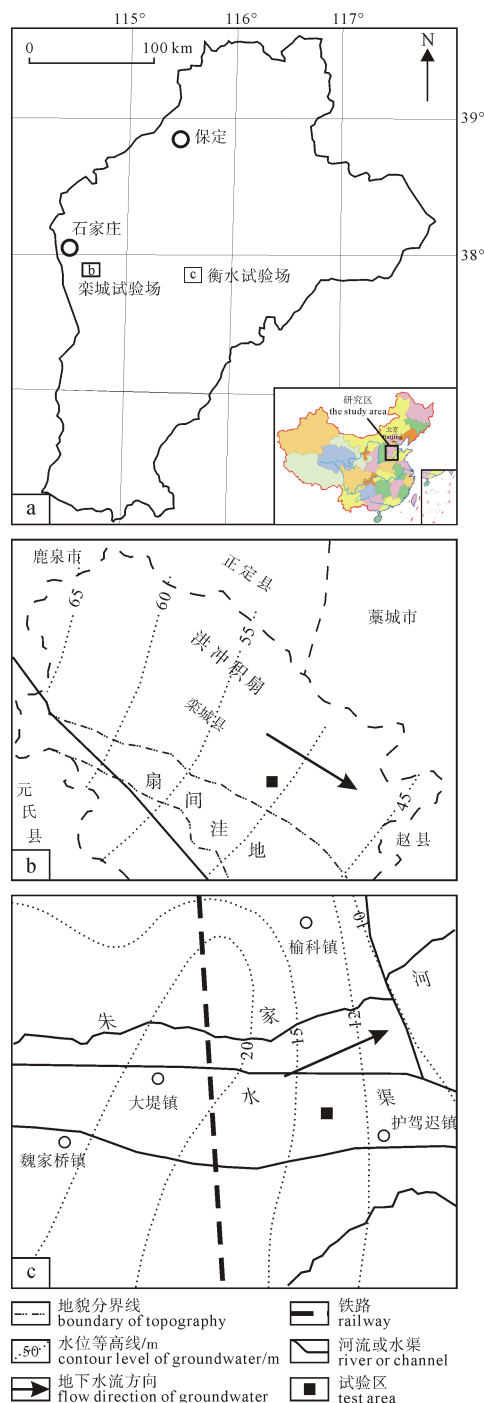


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

a-示踪试验位置; b-栾城试验点地貌; c-衡水试验点地貌
a-locations of the tracing test; b-geomorphology of the Luchang site;
c-geomorphology of the Hengshui site

中细砂为主, 夹杂薄层粘土或粉质粘土(吴庆华等, 2012)。

衡水研究区位于衡水市护驾迟镇, 东经 115°30′—115°45′, 北纬 37°50′—38°00′, 面积 60 km²。地处滹沱河古冲积扇的前缘, 滹沱河与滏阳河沉积的交错地带。年平均气温 13.0℃, 1 月气温最低, 平均值为-2.65℃, 7 月温度最高, 平均值为 26.2℃, 其中 2010 年 7 月最高 28.9℃(月平均)。年均降水量 449.5 mm (1991—2011 年), 年内降水多集中在 7—9 月, 占 70%以上。地下水含水层组复杂, 含水层与弱透水层相间沉积, 其地层岩性主要以粘土、粉质粘土、粉细砂、细砂、中细砂。咸水含水层广泛分布。包气带岩性以粘土为主。

1 试验装置与数据获取

采用保守型固态 NaBr 和高浓度氚作为示踪剂, 每点投放量分别为 200 g NaBr 和 30 mL 氚水(浓度为 2×10⁶ TU 单位)。通过分析长序列土壤水动态监测数据, 其结果表明 2.0 m 以下土壤水分常年向下运移, 即经过该界面的水量都视为地下水入渗补给量(吴庆华等, 2010, 2012; 靳孟贵等, 2006)。因此, 选取 2.0 m 深度及以下为示踪剂投放点。

图 2 为示踪试验装置及示踪过程图。NaBr 和氚水示踪剂分别通过 PVC 管(直径 2 cm)和医用软管(直径 1 cm)沿直径为 5 cm 的微型预钻孔投放到指定的示踪深度, 如 2.0 m、2.5 m、3.0 m 等。先投放氚, 然后覆盖 1 cm 厚原状土, 再投放 NaBr。从预制孔中采取的岩芯需按深度顺序放置, 并将其破碎至 2~5 mm 粒径, 待示踪剂投放完毕后依次将其回填。为了保证回填和原状土壤具有相同或相近的土壤孔隙特征, 则控制每隔 5 cm 击实, 且在 2011 年示踪剂取样时发现回填效果良好。

示踪试验分别在中国科学院栾城试验站和中国地质科学院衡水试验场进行。共开展了不同土地

利用方式与不同示踪深度试验 16 组, 见表 1。示踪剂投放时间为 2009-12-18—2009-12-19, 取样时间为 2011-04-04—2011-04-05。

利用原状土壤取样器(Soil coring kit 04.16 made in Holland)进行示踪剂土样采集。0—0.8 m 深度范围内每隔 10 cm 取样, 0.8—3.0 m 每隔 20 cm 取样。测试样品土壤质量含水量、土壤水中 NaBr 和氚含量。用铝盒(直径 5.0 cm)采集土壤含水量样, 质量为 50 g, 现场采用便携电子天枰(H2F-A2000, 精度 0.1 g)称量土样质量, 然后送实验室进行 24 h 烘干(105℃)测量。用透明自密封袋采集 NaBr 样品, 质量为 50 g, 送中国地质科学院水文地质环境地质研究所采用电感耦合等离子体质谱仪测试(ICPS)。将 200 g 氚土样用保鲜膜密封包裹和胶带固定密封, 储存于保温箱中(4℃), 送中国地质大学(武汉)环境学院检测。氚的测试是采用一种基于液氮冷却技术的土样处理装置将土壤中氚分离出来, 然后用液闪仪进行测试(Tri-Carb3170 TR/SL)。

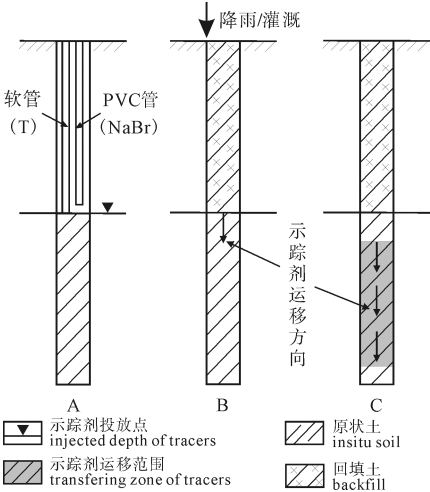


图 2 示踪试验示意图

Fig. 2 Steps of tracing test in the field

A-示踪剂投放; B-示踪过程; C-示踪结果

A-injecting tracers; B-tracing process; C-results of tracing test

表 1 示踪试验概况一览表

Table 1 Chart of the tracers test

编号	土地利用	示踪剂	灌溉方式	示踪深度/m	运移深度/m	编号	土地利用	示踪剂	灌溉方式	示踪深度/m	运移深度/m
LC01	种植+覆盖	溴和氚	漫灌	2.0	2.6	HS01	种植	溴和氚	沟畦灌	2.0	0.8
LC02	种植	溴和氚	漫灌	2.0	2.2	HS02	种植+覆盖	溴和氚	漫灌	2.0	0.8
LC03	种植	溴和氚	漫灌	3.0	1.5	HS03	无人类活动	溴	无	2.0	0.8
LC04	种植	溴和氚	漫灌	4.0	2.0	HS04	无人类活动	溴	无	2.5	0.8
LC05	无人类活动	溴	无	2.0	2.6	HS05	无人类活动	溴	无	3.0	0.6
LC06	无人类活动	溴	无	3.0	1.4	HS06	无人类活动	溴	无	3.5	1.0
LC07	无人类活动	溴	无	4.0	0.4	HS07	无人类活动	溴	无	4.0	1.0
LC08	草地	溴和氚	无	2.0	4.2	HS08	种植	溴	喷灌	2.0	1.2

注: LC 代表中国科学院栾城试验点, HS 代表中国地质科学院水文地质环境地质研究所衡水试验点。

2 人工示踪方法评价原理

2.1 传统方法

保守型人工示踪法是目前评价地下水入渗补给量的常用方法。该方法具有操作简单和适用性强等特点而被广泛应用(Alcalá, 2008; Huang et al., 2010; Scanlon et al., 2007), 其基本原理是: 在地下一定深度(防止示踪剂蒸发以及翻耕土地对示踪源的影响)投放示踪剂, 经过一段时间后获取土壤示踪剂浓度剖面, 确定溶质运移峰值, 根据公式(1)计算地下水入渗补给量:

$$R = v \times \theta = \frac{\Delta Z}{\Delta t} \times \theta \quad (1)$$

其中, R 为地下水入渗补给量(mm/a); v 为土壤水垂直入渗速率(mm/a); ΔZ 为示踪剂峰值迁移距离(mm); Δt 为示踪剂投放与取样的时间间隔(a); θ 为 ΔZ 深度范围内土壤水平均体积含水量(mm^3/mm^3)。但该方法评价精度受取样间隔影响。应用该方法关键在于选择正确的示踪剂投入深度, 一般选在该研究区土壤水长年入渗界面处。如果示踪剂投入深度在入渗界面以上, 且两者之间存在大量根系时, 示踪结果偏大。只有当两者之间植物根系吸水作用忽略不计时, 示踪结果才能准确代表该时段的地下水入渗量。且该方法对地下水入渗补给量较小的衡水地区不适用。该地区土壤以重粘土为主, 渗透性极低, 年度内溶质浓度峰值运移距离小于 5 mm(假设年入渗补给量为 10.0 mm/a, 土壤体积含水量 0.3), 在实际工作中难以获得。汪丙国(2008)利用人工氙和溴进行示踪试验, 发现无示踪峰值, 其地下水入渗补给量为零, 明显与示踪剂在土壤剖面上有明显迁移(距离超过 1.0 m)不相符。

由于土壤结构的复杂性, 人工示踪剂在土壤剖

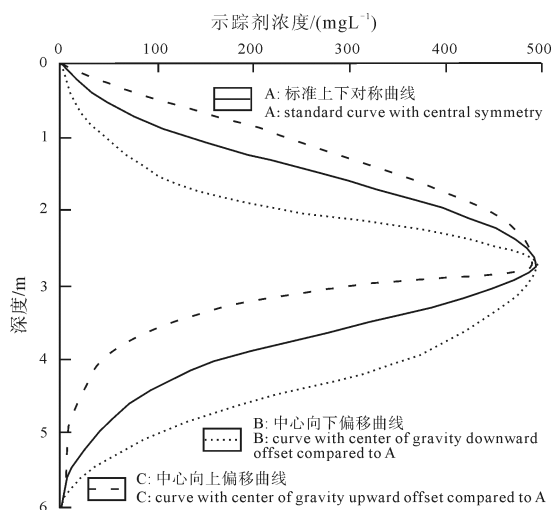


图3 人工示踪剂浓度剖面模式

Fig. 3 Distribution models of concentrations of applied tracers in the soil profile

面上将可能有三种分布模式, 如图 3 所示。A 代表标准的上下对称曲线, B 和 C 浓度曲线重心相对于浓度峰值分别向下和上漂移, 所代表的土壤水运移特征及其入渗补给量都不相同, 但根据公式(1), 相同的示踪剂迁移锋面深度, 则其入渗补给量相等, 与实际情况不符。因此, 以浓度峰值作为地下水补给评价依据的方法存在明显不足, 需要改进。

2.2 多区模型

2.2.1 示踪剂迁移实质

示踪剂在土壤剖面上的浓度分布模式是示踪剂在试验期间对流弥散作用的结果。溶质对流弥散的实质是溶质在溶液中的迁移受溶质分子扩散、机械弥散和对流作用的结果。机械弥散作用是因土壤介质孔隙大小不一、形状不规则和发育方向各异等特点, 导致水溶液在土壤中流速大小与方向各不相同, 使溶质分子运移分散并扩大其运移范围, 与活塞流相比形成更大的溶质晕。本质上, 土壤结构是造成土壤中溶质机械弥散的内在原因。同样水分子在土壤介质运移过程中也会因为土壤结构等原因造成与溶质弥散相同的情况——“水分子机械弥散”。由于本文所采用的氙和溴离子均为理想的保守型示踪剂, 示踪剂与水分子具有完全相同的水流特征。因此, 保守溶质的机械弥散是由土壤结构和水流作用引起的。

分子扩散是由于分子的热运动引起的运动, 其变化趋势是溶质分子由高浓度向低浓度区运移, 最后达到浓度均匀。由于受土壤含水量、土壤孔隙弯曲程度以及孔隙连通性影响, 溶质在土壤水中的扩散系数要比自由水中小很多。Olsen 等(1968)认为在土壤含水量为 0.3~0.4 时, $D_w = 0.05 \sim 0.78 D_0$, 其中 D_w 和 D_0 分别为溶质在土壤水和纯水中的分子扩散系数($\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$)。Vanderborght 等(2007)认为土壤中溶质分子扩散系数为 $0.5 \text{ cm}^2 \text{d}^{-1}$ 的倍数, 仅为水动力弥散系数的 5%, 因此可以忽略土壤中溶质分子扩散作用对土壤溶质运移的影响。

根据以上的分析结果, 人工示踪在土壤剖面上的浓度分布是由于土壤结构和土壤水对流入渗所致, 即示踪剂与通过人工示踪面上入渗土壤水的运移范围与浓度是完全一致的。

2.2.2 多区模型

由于土壤孔隙直径大小不一、分布不均匀以及弯曲程度和连续性等特点, 将土壤介质按其孔隙水运移速率从高到低划分为若干虚拟流区, 且假设各流区之间无水流相互作用, 各流区具有连续导水性, 为物理平衡水流(Köhne et al., 2009), 每个流区代表土壤水运移速率相同或相近的孔隙群。图 4 为多区入渗概念模型, 将整个土壤水流区划分为 N 流区, 同样将土壤剖面对应划分为 N 区。

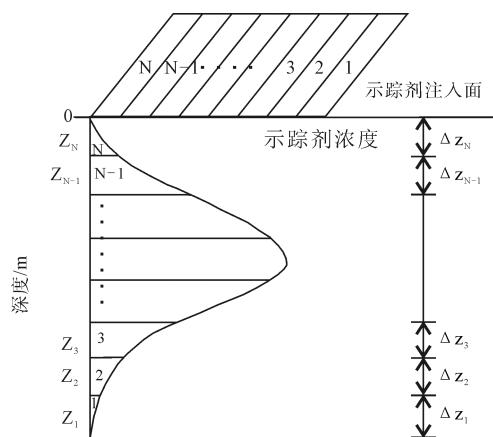


图4 人工示踪多区模型
Fig. 4 Multi-region model of applied tracers

第 1 个流区代表入渗速率最大的孔隙区, 孔隙水将运移至土壤剖面对应的第 1 区, 运移距离最大; 第 2 个流区代表入渗速率第二大的孔隙区, 孔隙水将运移至土壤剖面的第 2 区; 依此类推, 第 N 个流区代表入渗速率最小, 孔隙水将运移至土壤剖面顶端的第 N 区。由于每个流区土壤水运移速率一样, 其水流运移方式为活塞流, 则可采用公式(1)分别对每个流区进行入渗补给量计算。总入渗补给量为各个流区入渗补给量之和。因此, 可以利用公式(2)、(3)和(4)表示:

人工示踪剂注入面上:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{S} R \quad (2)$$

土壤剖面上:

$$R = \sum_{i=1}^N \alpha_i \times \bar{\theta}_i \times \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \frac{\Delta z_i \times \bar{c}_i}{\sum_{i=1}^N \Delta z_i \times \bar{c}_i} \quad (4)$$

其中, R 为总入渗补给量, mm/a; N 为土壤流区

数量; S_i 和 S 分别为人工示踪剂投放平面上第 i 流区和总流区面积, mm^2 ; ΔZ_i 为第 i 流区在垂直方向上运移的距离, mm; Δz_i 为土壤剖面上第 $i-1$ 与第 i 流区间距, mm; R_i 为第 i 流区入渗补给量, mm/a; α_i 为第 i 流区占总入渗补给量的比例系数; $\bar{\theta}_i$ 为土壤剖面上第 i 流区平均浓度所对应的深度与示踪剂投放处之间区域的平均土壤体积含水量, mm^3/mm^3 ; $\bar{c}_i$ 为土壤剖面上第 i 流区土壤中示踪剂的平均浓度, mg/L; 实际应用中 N 值与土壤剖面取样数量相等。

3 结果与分析

3.1 地下水入渗补给量评价

图 5 为不同土地利用方式和不同示踪深度条件下的人工示踪剂氟和溴的浓度剖面。根据公式(1)至(4), 利用多区模型方法评价栾城和衡水研究区地下水入渗补给量分别为 124.3 和 13.7 mm/a, 明显高于传统法(分别为 103.3 和 0.0 mm/a), 见表 2。多区模型能适用于无溶质峰值的地区, 而传统示踪法则受限制。

3.2 优先流程度评价

优先流的实质是在多孔介质中一部分水流速度明显大于介质平均流速的现象。优先流是速度上的优先到达, 而不是水量的占优。对于土壤水入渗补给过程来说, 将土壤水流速率明显大于其他部分水流的现象定义为优先流, 即优先流运移速大于整个流区土壤水流速率。因此, 将 0.5~1.0 $Z_{\max}$ ($Z_{\max}$ 为示踪剂最大入渗距离)范围定义为优先流区, 其对应的入渗补给量为优先流引起的入渗补给量。评价结果如表 3 所示, 栾城和衡水地区优先流入渗补给量分别为 36.05 和 0.32 mm/a, 分别占总入渗补给量的 28.7%和 2.3%。栾城地区优先流程度明显高于衡水地区, 其主要原因是栾城研究区为常年种植区, 2.0 m 以下作物根系相对发育, 其土壤岩性以亚

表 2 利用人工示踪方法评价地下水入渗补给结果
Table 2 Results of groundwater recharge using the method of applied tracers

编号	示踪剂	入渗补给量/(mm/a)		编号	示踪剂	入渗补给量/(mm/a)	
		多区模型法	传统峰值法			多区模型法	传统峰值法
LC01	溴	149.5	160.8	LC08	氟	116.8	62.7
	氟	167.5	160.8		溴	13.8	0.0
LC02	溴	154.2	141.0	HS01	氟	13.2	0.0
	氟	159.4	141.0		溴	13.2	0.0
LC03	溴	142.6	110.4	HS02	氟	12.9	0.0
	氟	127.8	110.4		溴	12.5	0.0
LC04	溴	147.8	135.0	HS03	氟	12.1	0.0
	氟	129.9	135.0		溴	15.4	0.0
LC05	溴	96.0	68.5	HS04	氟	14.2	0.0
	氟	76.6	54.8		溴	13.9	0.0
LC06	溴	64.0	0.0	HS05	氟	15.0	0.0
	氟	83.6	62.7		溴	14.4	0.0
LC07	溴			HS06	氟		
	氟				溴		
LC08	溴			HS07	氟		
	氟				溴		
LC09	溴			HS08	氟		
	氟				溴		

表 3 地下水入渗补给中优先流程度评价结果
Table 3 Percentages of groundwater recharge by preferential flow

编号	$Z_{\max}$ /m	$0.5Z_{\max}$ /m	优先流补给量 /(mm/a)	优先流程度/ %	编号	$Z_{\max}$ /m	$0.5Z_{\max}$ /m	优先流补给量 /(mm/a)	优先流 程度/%
LC01	2.6	1.3	33.7	22.5	HS01	0.8	0.4	0.19	1.4
LC02	2.2	1.1	52.8	34.3	HS02	0.8	0.4	0.10	0.8
LC03	1.5	0.75	60.1	42.2	HS03	0.8	0.4	0.24	1.9
LC04	2.0	1.0	82.0	55.5	HS04	0.8	0.4	0.18	1.2
LC05	2.6	1.3	15.3	15.9	HS05	0.6	0.3	0.25	1.8
LC06	1.4	0.7	9.24	12.1	HS06	1.0	0.5	0.23	1.7
LC07	0.4	0.2	16.78	26.2	HS07	1.0	0.5	0.13	0.9
LC08	4.2	2.1	18.5	22.2	HS08	1.2	0.6	1.2	8.3

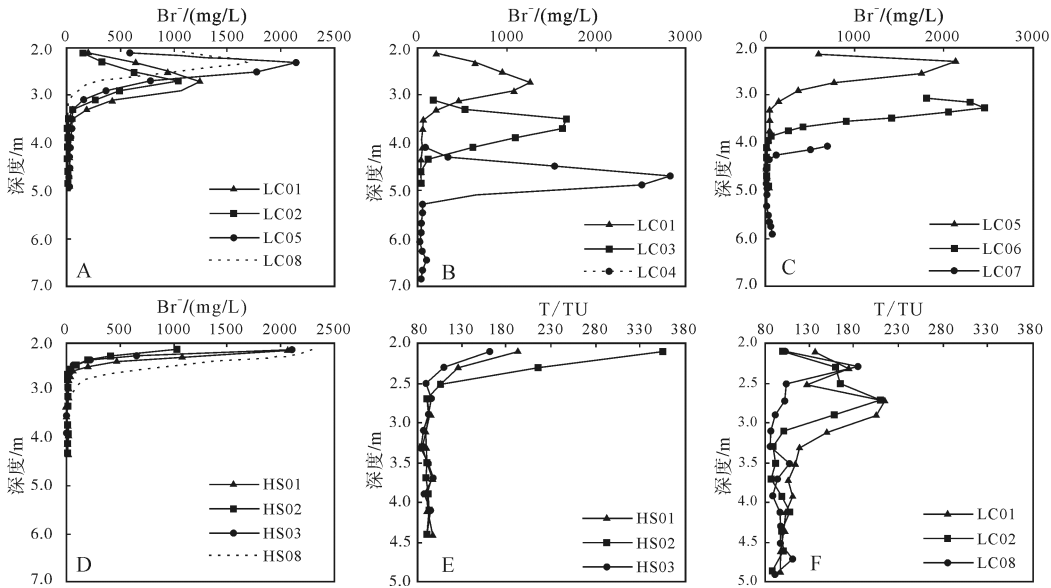


图 5 示踪剂浓度剖面

Fig. 5 Tracers' concentration profiles in LC and HS sites

A-LC 不同土地利用方式(Br^-); B-LC 不同示踪深度(Br^-); C-LC 无人类活动不同示踪深度(Br^-);

D-HS 不同土地利用方式(Br^-); E-HS 不同土地利用方式(T); F-HS 无人类活动不同示踪深度(Br^-)

A-different land use styles in the LC site (Br^-); B-different injected depths of the tracers (Br^-) in the LC site; C-different injected depths of the tracers (Br^-) without human activities in the LC site; D-different land use styles in the HS site (Br^-);

E-different land use styles in the HS site (T); F-different injected depths of the tracers (Br^-) without human activities in the HS site

砂土和亚粘土为主, 夹杂薄层粘土, 而衡水地区耕作历史短, 2.0 m 以下作物根系相对少, 以重粘土和亚粘土为主, 土壤结构密实, 大孔隙结构不显著。另外试验期间栾城和衡水地区降雨和灌溉量之和接近, 分别为 739.5 mm 和 742.6 mm, 与降雨或灌溉量相比, 土壤结构和质地是土壤水入渗量和优先流程度主要的控制因素。

3.3 土地利用方式影响优先流程度

LC01、LC02、LC05 和 LC08 优先流程度分别为 22.5%、34.3%、15.9%和 22.2%。秸秆覆盖抑制降雨或灌溉水入渗补给地下水, 且减缓优先流程度。吴庆华等(2008, 2009)在该研究区开展了秸秆覆盖与自然种植条件下土壤水动态监测试验, 其研究结果表明: 集中降雨时期(6—7 月), 秸秆覆盖对大降雨入渗具有一定的抑制作用, 削弱土壤水入渗过程中优先流程度。

无人类活动影响区其入渗补给量和优先流程度明显低于自然种植和草地。表明植被有利于土壤水入渗和优先流形成。土壤结构是其主要原因: LC05 地表仅有少量的杂草, 土地贫瘠, 蚯蚓等动物活动相比较少, 大孔隙不发育; LC01 和 LC02 为常年种植区, 作物根系发达, 蚯蚓等动物活动频繁, 大孔隙发育; LC08 为常年草地, 虽然作物根系发达, 但深度较浅, 主要分布在 0—0.3 m 深度范围内, 蚯蚓等动物活动相对种植区少, 大孔隙一般发育。

衡水地区由于土壤结构等原因导致其入渗补给量很小, 几乎全部以基质流入渗, 无明显优先流现象。虽然 HS01、HS02、HS03 和 HS08 土地利用与灌溉方式不同, 但对地下水入渗补给量均无明显影响, 说明与土地利用方式和灌溉量相比, 土壤结构与质地是控制该研究区土壤水入渗以及优先流的主要因素。

3.4 不同深度优先流程度

LC02、LC03 和 LC04 分别为自然种植条件下 2.0 m、3.0 m 和 4.0 m 深度处地下水入渗补给强度试验点, 研究表明: 随示踪剂投放深度增加, 优先流入渗补给量和优先流程度均增加, 但其入渗补给总量与示踪深度并无明显关系。另外, 作物根系和蚯蚓孔洞均随着深度增加呈指数减少。这说明优先流程度主要受土壤结构控制, 而不是入渗补给总量。

LC05、LC06 和 LC07 分别是无人类活动影响条件下 2.0 m、3.0 m 和 4.0 m 深度处地下水入渗补给试验点, 研究表明优先流入渗补给量和优先流程度与示踪剂示踪深度均无明显关系, 但入渗总量却随示踪深度增加而减小。表明, 人类种植活动改变了土壤空间孔隙结构, 导致其土壤入渗规律发生变化。

HS03、HS04、HS05、HS06 和 HS07 是衡水地区在无人类活动影响下不同示踪深度地下水入渗补给量示踪点, 研究表明: 各示踪深度处入渗补给总量和优先流入渗补给量均与深度无明显相关性。

4 结论

采用保守型人工示踪剂 NaBr 和氙进行了不同土地利用方式和示踪深度的地下水入渗补给研究, 其结果表明栾城和衡水地区地下水入渗补给量分别为 124.3 mm/a 和 13.7 mm/a, 优先流程度分别为 28.7% 和 2.3%。秸秆覆盖抑制优先流发育, 而农作物与草地均能有效地促进优先流发育, 增加地下水入渗补给, 减低灌溉或降雨利用效率。入渗补给量及其优先流程度主要受土壤结构控制。尽管在理论上多区模型与传统示踪峰值方法相比其评价结果更符合事实, 但还需进一步开展该方法的田间验证工作, 如在地中渗透仪中开展示踪试验等。另外, 该方法的评价精度一定程度上受取样精度的影响。因此, 减小取样间隔能有效提高其评价精度。

参考文献:

费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 王昭, 陈宗宇, 陈京生, 钱永, 李亚松. 2007. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 28(7): 567-571.

靳孟贵, 方连育. 2006. 土壤水资源及其有效利用——以华北平原为例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.

荆恩春, 费瑾, 张孝和. 1994. 土壤水分通量法实验研究[M]. 北京: 地震出版.

雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 1999. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 10(3): 311-318.

汪丙国. 2008. 地下水补给评价方法研究——以华北平原为例[D]. 武汉: 中国地质大学.

吴庆华, 王贵玲, 蔺文静, 张发旺. 2012. 太行山山前平原地下水补给规律分析: 以河北栾城为例[J]. 地质科技情报, 31(2): 99-105.

吴庆华, 张薇, 蔺文静, 王贵玲. 2009. 秸秆覆盖条件下土壤水动态演变规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 27(4): 76-82.

吴庆华, 张薇, 蔺文静, 王贵玲. 2010. 太行山前平原土壤水高效利用及精确灌溉制度研究[J]. 中国农村水利水电, (4): 58-61.

吴庆华. 2008. 人类活动影响下土壤水动态演变及其高效利用[D]. 北京: 中国地质科学院.

References:

- ALCALÁ F J, CUSTODIO E. 2008. Atmospheric chloride deposition in continental Spain[J]. Hydrological Processes, 22: 3636-3650.
- DASSI L. 2010. Use of chloride mass balance and tritium data for estimation of groundwater recharge and renewal rate in an unconfined aquifer from North Africa: a case study from Tunisia[J]. Environ Earth Science, 60: 861-871.
- FEI Yu-hong, ZHANG Zhao-ji, ZHANG Feng-e, WANG Zhao, CHEN Zong-yu, CHEN Jing-sheng, QIAN Yong, LI Ya-song. 2007. An Analysis of the Influence of Human Activity and Climate Change on Water Resources of the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(7): 567-571(in Chinese with English abstract).
- GATES J B, EDMUNDS W M, MA J, SCANLON B R. 2008. Estimating groundwater recharge in a cold desert environment in northern China using chloride[J]. Hydrogeology Journal, 16(5): 893-910.
- HEALY R, COOK P. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge[J]. Hydrogeology Journal, 10(1):91-109.
- HUANG T, PANG Z. 2010. Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: a case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of China[J]. Hydrogeology Journal, 19(1): 177-186.
- JIN Meng-gui, FANG Lian-yu. 2006. Soil water resource and effective utilization: a case of the North China Plain[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- JIN Meng-gui, ZHANG Ren-quan, SUN Lian-fa, GAO Yun-fu. 1999. Temporal and spatial soil water management: A case study in the Heilonggang region, PR China[J]. Agricultural Water Management, 42: 173-187.
- JING En-chun, FEI Jin, ZHANG Xiao-he. 1994. Research on soil water flux in experiments[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).
- KITCHING R, SHEARER T R, SHEDLOCK S L. 1977. Recharge

- to Bunter sandstone determined from lysimeters[J]. *Journal of Hydrology*, 33: 217-232.
- KÖHNE J M, KÖHNE S, SIM N J. 2009. A review of model applications for structured soils: A Water flow and tracer transport[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104(1-4): 4-35.
- KÖHNE S, LENNARTZ B, KÖHNE J M, ŠIM NEK J. 2006. Bromide transport at a tile-drained field site: experiment, and one- and two-dimensional equilibrium and non-equilibrium numerical modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 321(1-4): 390-408.
- LEI Zhi-dong, HU He-ping, YANG Shi-xiu. 1999. A review of soil water research[J]. *Advances in Water Science*, 10(3): 311-318(in Chinese with English abstract).
- LIN Rui-fen, WEI Ke-qin. 2006. Tritium profiles of pore water in the Chinese loess unsaturated zone: implications for estimation of groundwater recharge[J]. *Geography*, 328: 192-199.
- LU Xiao-hui, JIN Meng-gui, GENUCHTEN M T, WANG Bing-guo. 2011. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China[J]. *Ground Water*, 49(2): 286-94.
- MA J Z, DING Z, GATES J B, SU Y. 2008. Chloride and the environmental isotopes as the indicators of the groundwater recharge in the Gobi Desert, Northwest China[J]. *Environmental Geology*, 55: 1407-1419.
- OLSEN S R, KEMPER W D. 1968. Movement of nutrients to plant roots[J]. *Advances in Agronomy*, 20: 91-151.
- SCANLON B R, REEDY R C, TACHOVSKY J A. 2007. Semi-arid unsaturated zone chloride profiles: archives of past land use change impacts on water resources in the Southern High Plains, United States[J]. *Water Resources Research*, 43: 1-13.
- ŠIMŮNEK J, BRADFORD S A. 2008. Vadose zone modeling: introduction and importance[J]. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 581-586.
- VANDERBORGHT J, VERECKEN H. 2007. Review of dispersivities for transport modeling in soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 6(1): 29-52.
- WANG Bing-guo, JIN MENG-gui, NIMMO J R, YANG Lei, WANG Wen-feng. 2008. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 356: 209-222.
- WANG Bing-guo. 2008. Research on estimation methods of groundwater recharge: a case study in North China Plain[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-hua, WANG Gui-ling, LIN Wen-jing, ZHANG Fa-wang. 2012. Estimating groundwater recharge of Taihang Mountain piedmont in Luancheng County, Hebei Province, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 31(2): 99-105(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-hua, ZHANG Wei, LIN Wen-jing, WANG Gui-lin. 2009. Study on soil water dynamics evolvement law under straw mulching condition[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 27(4): 76-82(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-hua, ZHANG Wei, LIN Wen-jing, WANG Gui-lin. 2010. A Study of Soil Water High Effective Utilization and Precise Irrigation System in the Piedmont of the Taihang Mountains[J]. *China Rural Water and Hydropower*, (4): 76-82(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-hua. 2008. Soil water dynamic evolvement and high efficiency utilization under the influence of human activity[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).