

乌兰布和沙漠北部地下水资源的环境同位素探讨

顾慰祖¹, 陆家驹¹, 谢 民¹, 张汝智²

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 河套灌溉管理总局, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: 工作范围在乌兰布和沙漠北部, 面积共约 4 200 km²。年平均降水量 85 ~ 140 mm, 由西南向东递增, 降水同位素组成 D ~ ¹⁸O 恰与 Craig 线一致, 并与阿拉善地区相同。测得地下水中同位素含量范围, ¹⁸O 为 - 7.4 ‰ ~ 12.1 ‰, 氡为 0 ~ 190 TU, ¹⁴C 为 1.7 ~ 97 pMC。由地下水同位素组成区别出与降水线平行或相交的 6 种类型。从所有地下水水点, 以及可能有补给关系的其它水点的各类同位素关系, 包括 ¹⁸O, T, ¹³C 和 pMC, 识别出两类承压水的各 3 个补给源和潜水的 3 个补给源, 并区别出一组氡含量极低的潜水, 对不同位置的承压水和潜水, 由其同位素关系估算出了各补给源的组成和变幅。

关键词: 地下水; 水资源; 环境同位素; 干旱地区; 沙漠; 内蒙古

中图分类号: X 143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)03-326-07

乌兰布和沙漠东邻黄河, 南北跨内蒙古西部阿拉善左旗和磴口县境, 约 7 000 km²。其北端为河套灌区之包尔陶勒盖灌域, 可灌面积约为该灌域之 1/5, 不到 300 km², 主要集中在灌渠周围。由于其临近黄河, 有扩充灌溉面积开发“第二河套”之议, 但分配给内蒙古的引黄水量有所限制, 在实现西线南水北调之前, 难望增加, 需对地下水资源开发利用的可能性进行研究。

本工作范围包括 40°08' N 以北的乌兰布和沙漠及其西北部狼山山地和北部后套平原少部分共约 4 200 km², 大体为断陷盆地(图 1)。年降水量由本区东部 140 mm 降至西南部 85 mm。地层从下到上为 Q₃、Q₂ 湖积层, Q₃、Q₄ 河、湖相沉积、冲积、洪积层, 以及 Q₄ 风积层。第四系厚度可达约 500 m, 含水层厚度由本区中、北部的 100 ~ 160 m 向东、西趋薄, 局部厚达 183 m, 为上部潜水下部承压水结构, 地面大致以约 1/5 000 坡度由黄河向西北倾斜, 与山前宽约 1 ~ 5 km 冲积洪积扇相接。黄河自晚更新世以来曾几次由西向东移动, 遗有古黄河沉积, 并在故道处形成小型湖泊(“海子”)。

1 方法和取样

本工作主要使用水中同位素 ¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C 和 ¹⁴C, 共采集各种水样 280 个, 包括降水、地表水(黄河河水、湖水、灌溉引黄水)、浅井和深井地下水、泉水。由于需要识别地下水各种补给源及其组成, 因此取样范围还包括了狼山和后套平原一部分。地下水采样点共 68 处(图 1)。水

收稿日期: 2000-03-26; 修订日期: 2000-10-18

基金项目: 南非 Witwatersrand 大学资助项目

作者简介: 顾慰祖(1934 -), 男, 江苏常州人, 教授级高级工程师, 主要从事实验水文学和同位素水文学研究。

同位素均在南非 Schonland 核科学研究中心分析。1997 年根据国际原子能机构 1995 年维也纳讨论会对本工作初步成果的建议,又在德国补充分析了一些¹⁴C 水样。

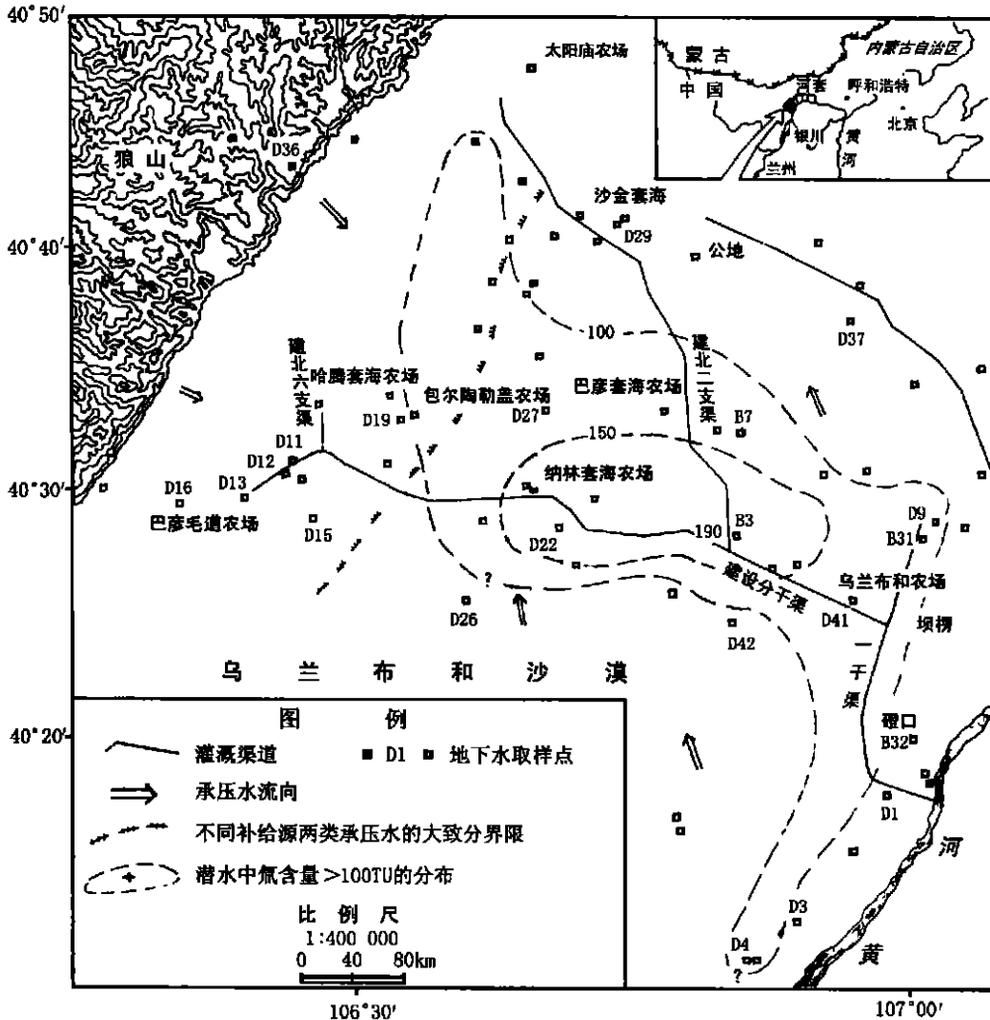


图 1 乌兰布和沙漠北部地下水测点分布

Fig. 1 Location of study area ,the north Wulan Buhe Desert ,and the sampling sites of groundwater

2 结果和讨论

2.1 降水

本地区降水中氢、氧同位素组成 ¹⁸O 和 D 有较大变幅,但氚含量较为稳定,在 30~40TU 之间,氢、氧同位素关系 $D = S^{18}O + d$ 中,求得 $S = 8, d = 10$, 正与 Craig 线(或世界降水线 WMWL)一致。这与非洲等干旱、沙漠地区所报导的降水线其 d 一般大于 10 有很大不同,如地中海东部沙漠有 $d = 22$ ^[1], 与中国降水同位素站网^[2]中相邻站如银川也不同,同为干旱区的和田也与

此不同。但与本区西邻阿拉善高原降水线完全一致^[3]，这一方面表明本区降水的主要水汽源地和输入途径与阿拉善相当，经与乌兰巴托等北部相邻站相比较，认为主要是来自北冰洋，且西伯利亚大型水体也参与水汽贡献^[4]，另一方面 $s = 8$ 则反映了降水系统的热力条件、云团冷凝过程基本上属于平衡过程，没有明显的动力分馏。

2.2 承压水

采集了区内所有深井的地下水水样，最大井深 120 m，井内水位埋深不超过 7 m，主要为位于 Q₃ 含水层的浅层承压水，承压水氢、氧同位素关系与降水线比较，有 3 种情况：与降水线相同，即 $s = 8, d = 10$ ；与降水线平行，即 $s = 8, d < 10$ ；与降水线相交，即 $s < 8, d < 10$ 。这表明本区承压水的多样性，具有各不相同的成因和补给源。

2.2.1 四种类型

(1) 古地下水 由氡和¹⁴C 识别，其¹⁴C 年龄约 1 万 ~ 3 万年 BP。典型的如 D41 地下水，不含氡，¹⁴C 年龄达 30 000 年，此类地下水的 D ~ ¹⁸O 关系与降水线平行(图 2 中 A)为

$$D = 8 \text{ }^{18}\text{O} + 8$$

其 TU ~ pMC 和 pMC ~ ¹³C 关系分别为图 3 和图 4 中 A 组，其大体分布范围在 D41、D19、D12 一带，它应是相当于第四冰期进入断陷盆地的古溶滤 - 渗入水。一般认为，古地下水的氡盈余趋向减少，如埃及西部沙漠含水层地下水有与本区相似的上述关系，但氡盈余为 +3，则较本区更为古老。

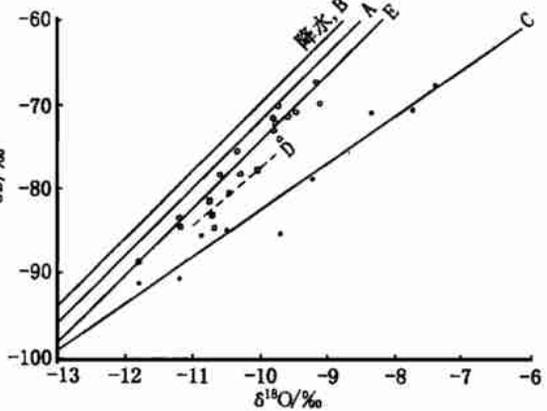


图 2 降水和各类地下水的 D ~ ¹⁸O 关系(仅标出部分点据)

Fig.2 Stable isotopic composition D versus ¹⁸O of precipitation and groundwaters(only a part of the data is shown)

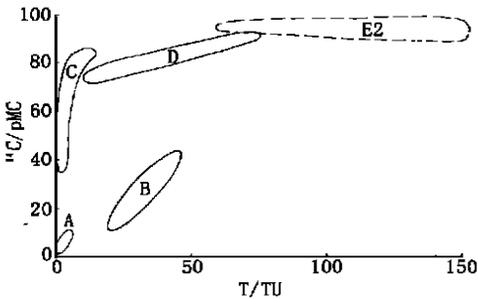


图 3 地下水中氡和¹⁴C 含量的关系

Fig.3 Tritium and radiocarbon composition in groundwaters

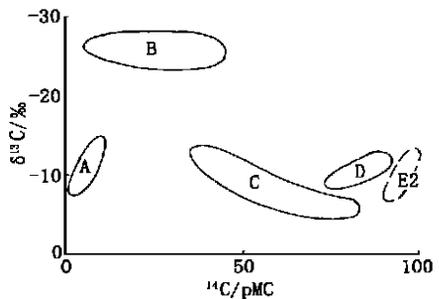


图 4 地下水中¹⁴C 和¹³C 含量的关系

Fig.4 Relationship between ¹⁴C and ¹³C of groundwaters

(2) 山地裂隙泉水 它源于狼山山地，与古地下水相似其 D ~ ¹⁸O 关系平行于降水线(图 2 中 B)为

$$D = 8 \text{ }^{18}\text{O} + 9.8$$

可认为与降水线相同。它以极低 ^{13}C 与所有地下水不同为其主要特点, 但氡可达 50TU, 应有近代补给混入, 见图 3 和图 4 中 B 组, 典型如 D36 地下水, ^{14}C 年龄为 7000 年, 有特低的 ^{13}C 达 - 25.4 ‰, 与上述古地下水平均 ^{13}C 为 - 11.5 ‰明显不同(图 4), 前者属光合循环类型中典型的 C3 型(C3 型植物的平均 ^{13}C 约为 - 27 ‰), 应源于树木与陆生植物, 而 A 组则为 C4 型。

(3) 混合型地下水 本区大部分深井地下水属此类, 其 ^{14}C 有较大变幅可达 80pMC 以上(图 3 中 C 组), 其 ^{13}C 也属光合循环类型中的 C4 型(图 4 中 C 组)。其 $D \sim ^{18}\text{O}$ 关系有(图 2 中 C)

$$D = 5.53 \text{ } ^{18}\text{O} - 27.4$$

因而它明显起源于降水, 以此与降水线相比较, 可求得它在未与其它水源相混合前的初始 D 将低于 - 110 ‰, 估计其形成时的年平均气温约为 - 2 ℃。

(4) 由黄河渗漏形成的地下水 主要由黄河包括其东移过程中的深层渗漏所形成, 由图 3 和图 4 中 D 组, 可见其含有高 pMC 和高 TU 的近代补给, 其 $D \sim ^{18}\text{O}$ 关系中, s 约为 7, d 约为 - 10(图 1 中 D), 由于此类水样数量不足, 未求出此项关系。

2.2.2 水源组成

(1) 流向和补给源 首先由 ^{14}C 的空间分布识别出承压水流向(图 1)。从所有承压水水点和可能有补给关系的所有水点的各类同位素关系, 包括 ^{18}O , T, ^{13}C 和 pMC, 可识别出各有 3 个补给源的两类承压水:

一类: 补给源为古地下水, 沙漠降水下渗和黄河渗漏水。

二类: 补给源为古地下水, 沙漠降水下渗和山地裂隙泉水。

以上两类承压水的大致分界见图 1。各补给源的代表性水点及其同位素组成见表 1。

表 1 补给源的代表性水点及其同位素组成

Table 1 Isotopic composition of the source-waters of confined groundwater representative sites

水 源	代表性水点	补给源			
		$^{18}\text{O}/\text{‰}$	T (TU)	pMC	$^{13}\text{C}/\text{‰}$
古地下水	D41	- 12.0	0.0 ±2.4	1.7 ±0.4	- 9.0
沙漠降水下渗	D26	- 6.7	2.0 ±3.2	58.0 ±0.9	- 6.8
黄河渗漏水	D4	- 10.8	67.8 ±3.1	90.2 ±0.8	- 11.3
山地裂隙泉水	D36	- 10.1	44.2. ±3.2	42.0 ±0.7	- 25.4

(2) 水源组成 对于不同位置的各深井地下水, 其三种补给源, , 的水源组成 n_1, n_2, n_3 , n_i 可由三参数混合模型作出估算^[5], 对上述两类承压水一些典型水点的水源组成见表 2。

表 2 两类承压水典型水点的水源组成

Table 2 Typical source-water composition of confined groundwaters

类 型	水点实例	水源组成/ %			
		古地下水	沙漠降水下渗	黄河渗漏水	山地裂隙泉水
一 类	D15	0	21.2	-	78.8
	D16	26.4	0	-	73.6
	D13	13.0	15.8	-	71.2
二 类	D27	39.2	25.1	35.7	-
	B31	49.2	41.4	9.4	-

2.3 潜水

指从浅井所采集的地下水, 井深约在 15 m 以内, 水位埋深一般在 3 m 左右, 局部达 5m,

大部为 Q_3^1 , Q_3^{a1+1} , 少数为 Q_4^{col} 含水层。

2.3.1 同位素关系

从所有浅井获取的潜水水样, 有平行于降水线的特殊 $D \sim ^{18}O$ 关系(相关系数 0.91, 图 2 中 E) 为

$$D = 8 ^{18}O + 5.2$$

一般潜水的 $D \sim ^{18}O$ 关系均落在与降水线相交的蒸发线上, 此类平行于降水线的地下水关系极为少见, 主要出现在干旱地区。北撒哈拉有 $d = +6\%$ 和 $+5\%$ 的报道, 恰与本区相似。本区西部额济纳地区则有 $d = -22\%$ [6,71], 为迄今干旱地区此类地下水关系的最低 d 值 [3]。造成与降水线平行的原因, 认为主要是极端干旱地区特殊的潜水形成机制所致 [4,81]。

2.3.2 两类潜水

由图 5 可见, 包含于上述关系中的潜水, 以近期降水氘含量为界, 有明显的两类(图 5 中 E1、E2), 大于近期降水氘含量且有高达 190TU 的 E2 组, 显然是核爆以后, 特别是 1963 年以后的降水和灌溉渗漏所补给, 而 E1 组则是早期降水和黄灌下渗滞留在沙漠中的潜水, E1 中还有特殊的一组, 以小于 1 的极低氘含量和低 ^{18}O 为特征, 它是由特殊机制形成的, 曾在—高沙丘下试行挖掘(B7), 仅 0.8 m 深即取得潜水水样, 其同位素组成却与一般概念的估计相悖, 并非如设想的那样会因蒸发富集而产生高 ^{18}O , 并因降水而有较高含量的氘, 其 ^{18}O 却为 -11.3% , T 则为 0.3TU, 均接近本区潜水的最低值。

2.3.3 补给源和水源组成

从所有降水、地表水、潜水水点和可能有补给关系的所有水点的各类同位素关系, 包括 ^{18}O , T, ^{13}C 和 ^{14}C , 可识别出本潜水有 3 个补给源: 近期降水, 如包尔陶勒盖 1993 年 9 月 6 日降水(谢冠中取样), $^{18}O = -7.07\%$, $T = 34.7 \pm 3.1TU$; 前期降水和灌溉下渗, 指发生在 1963 年后一些年内的下渗水, 以高氘含量为特征, 如 B3 水点, $^{18}O = -9.5\%$, $T = 190 \pm 2TU$; 早期降水和黄灌成因的沙漠潜水, 以低氘含量和低 ^{18}O 为特征。

潜水中各种补给源所占比例, 因不同位置而有很大不同, 对一些典型水点补给源的水源组成也可与承压水那样作出估算, 见表 3。

表 3 潜水典型水点的水源组成

Table 3 Typical source-water composition phreatic groundwater

典型水点	水源组成/ %		
	近期降水	前期下渗水	沙漠潜水
D22	1.3	84.1	14.6
D29	32.2	29.5	38.3
D37	15.7	2.7	81.6
D42	46.2	23.1	30.7

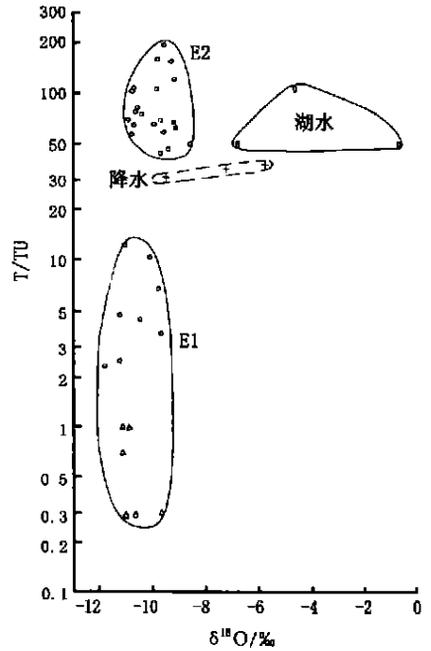


图 5 潜水和湖水中 ^{18}O 和氘含量的关系
Fig. 5 ^{18}O and tritium relationship of phreatic groundwater and of lake water

值得注意的是, 在相当大范围内潜水中的氡含量在 100TU 以上, 最高达 190TU, 其分布(图 1)正与主要灌溉渠系相符, 即在一干渠和建设分干渠北二支到六支范围内。这表明了数十年来强烈的渠系渗漏和灌溉下渗, 潜水氡含量随埋深而增, 氡剖面至 3 m 左右处达最大。由这一关系及上述平行于降水线的潜水氡盈余, 可粗略估算出潜水的年降水补给量约为 10 ~ 20 mm。

2.4 地表水

湖(海子)水的 ^{18}O 与 T 的关系, 见图 5。太阳庙海子湖水 ^{18}O 因蒸发富集而达 - 0.58% 的罕见高值, 氡含量则显然大于降水。

3 结 语

(1) 本区 $\text{D} \sim ^{18}\text{O}$ 降水线与西部阿拉善地区相同但与其它中国降水同位素站网各站均有不同, 反映了水汽来源和降水机制。潜水 $\text{D} \sim ^{18}\text{O}$ 也有与阿拉善地区相似即平行于降水线的特点, 为此类极端干旱和沙漠地区所特有。

(2) 由同位素关系识别出 6 种地下水, 按与降水线的关系有三类即 s 、 d 相同, s 相同、 d 不同, s 、 d 都不同。这包括承压水 4 种, 潜水 2 种, 反映了其不同的形成、起源和历史。

(3) 识别出补给承压水的 4 种水源即古地下水、沙漠降水下渗、黄河渗漏水 and 西北部狼山山地裂隙泉水, 由现有测点水样, 其各占比重分别为 0 ~ 49.2%, 0 ~ 41.4%, 0 ~ 35.7%, 0 ~ 78.8%; 识别出补给潜水的 3 种水源即近期降水、前期灌溉和降水下渗、早期降水和黄灌成因的沙漠潜水, 其各占比重分别为 1.3% ~ 46.2%, 2.7% ~ 84.1%, 14.6% ~ 81.6% 分别在不同位置的地下水往往有很不相同的水源组成。

(4) 初步结果表明, 本区地下水资源的开发利用有一定潜力, 但另一方面也暗示了以往灌溉方式的粗放。

(5) 本工作实际上只涉及浅层承压水, 位于 400 m 深淤泥层下的中、下更新世沉积中的深层地下水, 由于缺乏钻孔无法采集水样, 另在本区北部后套和南部沙漠地区, 地下水样尚感不足, 并缺乏时程变化。

致谢: 本工作得到南非 Witwatersrand 大学 Balthazar Verhagen 教授、内蒙古自治区水利厅韦仁民、吴黎明的指导和支持。在野外工作中得到河套灌溉总局一干灌域管理局、巴盟农垦水电管理局、磴口县水利局、巴盟巴彦套海农场、纳林套海农场、包尔陶勒盖农场、哈腾套海农场、巴彦毛道农场、速生林管理站、东风管理所等单位樊奉春、包云飞、张振山、王志刚、苑永东、李志格、王自忠、吕志勇、路曙光、杜俊民、魏日新、谢冠中、王国祥、胡开生、高文章、杜俊义、陈国范、贾文春等多方面的热情支持, 深为感谢。

参考文献:

- [1] Gat R, I Carmi. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area[J]. J Geophys Res. 1970, 75.
- [2] 赵珂经, 顾慰祖, 顾文燕, 等. 中国降水同位素站网[J]. 水文, 1995, 5.
- [3] Geyh M A, 顾慰祖, 刘 涌, 等. 阿拉善高原地下水的稳定同位素异常[J]. 水科学进展, 1998, 9(4): 333 -

337.

- [4] Gu Wei-Zu. Isotopically Anomalous Groundwater of Alxa Plateau[R]. IAEA Report, 1998.
- [5] 顾慰祖, 林曾平, 等. 环境同位素硫在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(1):14-20.
- [6] Geyh M A, Gu Wei-Zu. Preliminary isotope hydrological study in the arid Gurinai grassland area, Inner Mongolia[A]. In: Isotope Techniques in water resources Decelopment 1991[C]. IAEA, Vienna, 1992.
- [7] Geyh M A, Gu Wei-Zu, Dieter Jakel. Groundwater recharge study in the Gobi desert[A]. China. Geowissensxhsften, 14, Heft[C]. 7-8, 1996.
- [8] Geyh M A, Gu Wei-Zu. Isotopically highly enriched shallow groundwater below dry sediments[A]. In: Isotope Techniques in Water resources Development and Management 1999[C]. IAEA, Vienna, 2000.

Environmental isotope study of the groundwater resources in the North Wulan-Buhe desert, Inner Mongolia

GU Wei-zu¹, LU Jia-ju¹, XIE Min¹, ZHANG Ru-zhi²

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*

2. *Irrigation Administration Bureau of Hetao, Dengkou 015200, China)*

Abstract: The study area of about 4200 km² includes mainly the north part of the Wulan-Buhe Desert which is situated to the west of the Yellow River in Inner Mongolia, with an annual mean precipitation of 140 mm to 85 mm from its east to southwest. There are 68 sampling sites for groundwaters. In the relation $D = S^{18}\text{O} + d$, $S = 8$ and $d = 10$ are get for the precipitation, it is just the same as the WMWL. For the groundwaters, the most ¹⁸O values lie in the range of -7.4‰ to -12.1‰, the tritium content ranges from 0 - 190TU while the ¹⁴C values of 1.7-97 pMC are found. In comparison with the precipitation line, six kinds of groundwater with same or different A and d are found. From the isotopic relationships, four recharge sources are identified for the confined groundwater, i. e., the paleogroundwater, the spring from fissured rocks of Lang Shan mountainous area situated to the northwest of the Desert, the percolation from the Yellow River, and the deep infiltration water from sand dunes which is formed by precipitation with special mechanism. Three source waters of phreatic groundwater are identified, too. They are the recent precipitation, the early episodic precipitation recharge and the water from sand dunes. The contribution of individual recharge source to the confined/phreatic groundwater at different places is estimated by using the mixing model.

Key words: groundwater; water resources; environmental isotope; arid region; desert; Inner Mongolia