

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.004

河套灌区地表水与地下水转化及水盐运移规律

衣 鹏¹, 李文超¹, 万程炜²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 为研究河套灌区灌溉过程中地表水与地下水的转化以及盐分运移规律, 以灌区的巴彦淖尔市五原县为研究对象, 采用同位素示踪、水化学分析方法和线性端元混合模型定量评价了沟渠引水、地下水与地表泡田水的转化量。结果表明: 沟渠引水与地下水对地表泡田水补给比例分别为 65.15%、34.85%; 沟渠引水、地下水对泡田水补给的盐分分别占两水源补给总盐分的 53.31%、28.52%, 有 18.17% 的盐分在补给泡田水的过程中滞留在灌区土壤中。

关键词: 水化学分析; 水盐运移规律; 线性端元混合模型; 同位素示踪; 河套灌区

中图分类号: S271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0026-08

Transformation of surface water and groundwater and migration of water and salt in the Hetao Irrigation Area

YI Peng¹, LI Wenchao¹, WAN Chengwei²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To study the transformation of surface water and groundwater and during irrigation and the migration law of salts in the Hetao Irrigation District, Wuyuan County of Bayannur City in the irrigation district was taken as the research object. Isotope tracer, hydrochemical analysis method, and linear end-element mixed model were used to quantitatively evaluate the conversion amount of channeled water, groundwater, and stagnant water in the land. The results show that the proportion of the channeled water and the groundwater recharge to stagnant water in the land is 65.15% and 34.85%, respectively. The salt recharge of the channeled water and the groundwater to the stagnant water in the land accounts for 53.31% and 28.52% of the total salt of the two sources, respectively, and 18.17% of the salt remains in the irrigation district during the process of recharge to the stagnant water in the land.

Key words: hydrochemical analysis; movement of groundwater and salt; linear end-element mixed model; isotope tracer; the Hetao Irrigation District

土壤盐渍化是导致土壤荒漠化和退化的关键因素, 对生态环境和全球资源构成严重威胁。它不仅影响农作物的正常生长, 还成为制约农业发展的主要障碍。根据联合国粮食及农业组织的统计数据, 全球盐渍化土地面积高达 9.55 亿 hm^2 , 占全球陆地总面积的 7.26%, 在 2.3 亿 hm^2 的耕地面积中, 盐渍化土地的占比高达 19.57%^[1]。作为中国三大自流引水灌区之一, 河套灌区引黄灌溉控制面积达到 116.2 万 hm^2 ^[2]。随着节水改造工程的实施, 年均引水量已从 49 亿 m^3 减少至 36.4 亿 m^3 。然而, 灌区气候条件的不利影响以及灌溉条件的限制, 导致盐分难以有效排出, 使得整个灌区普遍面临积盐问题, 超过半数的土地已经受到不同程度的盐渍化影响, 转化为盐碱地。在河套灌区, 明沟排水为主要的排水方式^[3]。深入理解灌溉过程中地下水与地表水间的水盐运移机制, 对于实现水盐科学调控具有基础性意义。

近年来, 用于提高农业用水效率和防止土壤盐渍化的灌区尺度水文模型越来越受到重视^[4], 开发和优化了多种基于经验、概念、物理原理的数值模型。基于物理原理的模型包括 SWAT 模型^[5]、Hydrus 模型^[6]、SWAP 模型^[7]、SaltMod 模型^[8]。SWAT 模型被广泛应用于水流和非点源污染模拟^[9], Hydrus 模型则侧重土

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207363)

作者简介: 衣鹏 (1985—), 男, 教授, 博士, 主要从事青藏高原冻土水文循环过程同位素示踪与模拟研究。E-mail: pengyi1915@163.com

通信作者: 万程炜 (1993—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事同位素水文研究。E-mail: chengwei.wan@uwa.edu.au

引用本文: 衣鹏, 李文超, 万程炜. 河套灌区地表水与地下水转化及水盐运移规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 26-33.

YI Peng, LI Wenchao, WAN Chengwei. Transformation of surface water and groundwater and migration of water and salt in the Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 26-33.

壤和地下水的水流和溶质运移^[10],SWAP 模型主要应用于作物、水流和溶质运移^[11],他们在大尺度、短时间步长的农业水文过程应用最广泛。概念排水模型通常是基于水平衡法^[12-13]或通过改良半分布式水文模型而构建^[14],这些模型在模拟日或月度的排水和盐分循环方面表现出色,但它们对灌溉活动对水量平衡所产生的影响的考量尚显不足。

环境同位素可以有效示踪水的来源、不同环境下水的运移和数量(包括江河湖泊),还可以确定水的年龄、记录水-岩相互作用,尤其在研究地下水和地下水储量方面更卓见其效,是认识水的形成、运动及其成分变化机制的重要依据^[15-17]。氢氧稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^2\text{H}$)是稳定的环境示踪剂,有明显的时间与空间变化规律,不仅可以反映流域内蒸发、补给等水文信息还可以更加精准地刻画流域水循环过程及机制。例如,陈建生等^[18]通过氢氧同位素及水化学分析方法,发现内蒙古高原岱海除了接受降水的直接补给,还接受泉水的补给。Liu 等^[19]通过遥感以及深度网络学习技术研究了柴达木盆地湖泊补给来源及地下水循环模式,发现西藏的渗流水通过深环流输送到柴达木盆地,然后通过断裂带上升补给盆地地下水和湖泊。Wang 等^[20]通过对不同盆地水体的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 进行分析,发现巴丹吉林沙漠地下水资源丰富,在合理开发利用下,可以满足当地对沙漠地下水的需求。放射性同位素亦为各种水文地质作用的理想示踪剂,并因具有计时性而适用于研究大气降水的地面入渗、现代入渗起源、地下水补给、流动速率及地下水年龄等^[15]。 ^{222}Rn 是一种天然存在的放射性稀有气体,大量富集于地下水中,具有测量效率高、灵敏度高、能够精确定量计算等特点,是追踪地下水与地表水间水力交换的理想示踪剂^[21]。

本文以巴彦淖尔市五原县灌区为研究区域,运用同位素示踪技术,结合水化学分析方法,研究河套灌区灌溉过程中地表水与地下水之间的水盐迁移规律,以期为河套灌区乃至其他相似灌区的模型构建或优化提供坚实的理论基础。

1 研究区概况

五原县位于内蒙古自治区西部、巴彦淖尔市南部,地理位置介于 $40^{\circ}46'\text{N}\sim 41^{\circ}16'\text{N}$ 、 $107^{\circ}35'\text{E}\sim 108^{\circ}37'\text{E}$ 之间,与4个旗相邻,东邻乌拉特前旗,西与临河区接壤,南濒黄河并与鄂尔多斯市杭锦旗毗邻,北与乌拉特中旗毗连。全县总面积为 $2\,503\text{ km}^2$,南北最长距离约 55.5 km ,东西最长距离约 82 km 。五原县地处河套平原的中心地带,县域南临黄河(属黄河最北端),北有阴山横亘,占河套灌区总面积的 $1/4$;地势平坦,平均海拔 $1\,042\text{ m}$ 。五原县气候属中温带大陆性气候,具有光能丰富、日照充足、干燥多风、降水量少的特点。太阳年平均辐射总量 $153.44\text{ J}/\text{cm}^2$;全年日照时数 $3\,263\text{ h}$,平均气温 6.1°C ,积温 $3\,362.5^{\circ}\text{C}$;无霜期 $117\sim 136\text{ d}$;年均降水量 170 mm ,多数集中在夏秋两季,雨热同季,年均蒸发量 $2\,067.8\text{ mm}$,远大于年均降水量(图1)。

五原县的土壤种类多样,主要包括灌淤土、盐土、风沙土、碱土、潮土和新积土,其中灌区的主要耕作土壤是灌淤土。全县土地总面积为 374 万亩 ($1\text{ 亩}=666.67\text{ m}^2$),其中可耕地达到 164.5 万亩 ,果园地 4.17 万亩 ,林地 18 万亩 ,草地 30 万亩 。水资源方面,五原县地下水开采量达 18 亿 m^3 ,黄河水是其最大的地表水资源,年流量 336.5 亿 m^3 ,有5大干渠,9条分干渠,135条农渠,每年引水量 $10\sim 11.6\text{ 亿 m}^3$;地下水埋藏在第四纪沉积层中,一般埋深 $0.5\sim 3.2\text{ m}$,含水厚度 $30\sim 60\text{ m}$ 。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

在河套灌区五原县六排干、七排干和义通排干共设置175个采样点进行水样氢氧稳定同位素测定(图2),同时11个地下水、10个渠水、14个支沟水、5个斗沟、15个排干水、10个回归湖泊、6个乌加河、5个

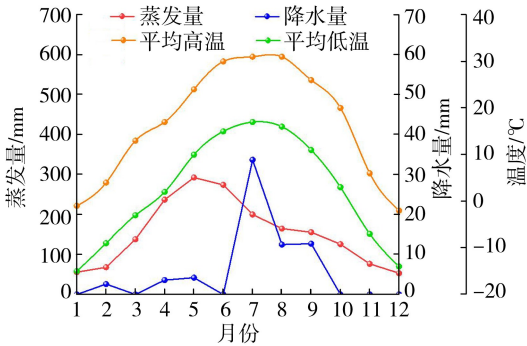


图 1 2023 年五原县降水量、蒸发量、平均高温和平均低温
Fig. 1 Rainfall, evaporation, average high temperature, and average low temperature in Wuyuan County in 2023

泡田水水样还测定了电导率(E_c)、 ^{222}Rn 和 TDS。水样于 2023 年 6 月 3—6 日采用自制取样器采集,并在现场采用 45 μm 孔径的滤膜进行过滤后装入干净且干燥的聚乙烯塑料瓶中,然后密封防止蒸发,在 4℃ 下保存直至仪器测量。

在现场,采用 RAD7 便携式氡监视器测定水样氡活度,Horiba 测量电导率(E_c)和 TDS。水样的氢氧稳定同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^2\text{H}$)在河海大学水灾害防御全国重点实验室使用 L2310-i 进行测量,采用 V-SMOW 标准,每个样品重复测量 6 次取平均值。

2.2 研究方法

通过分析灌区地下水与地表水的氢氧稳定同位素组成识别地下水与地表水的补给来源,通过分析氡同位素组成和水化学特征的变化对补给来源进行验证,然后应用线性端元混合模型,精确确定地表水补给来源的比例。

2.2.1 氢氧同位素示踪原理

氢氧同位素在自然界水体中以不同比例存在,这些比例的差异可以作为示踪自然界水循环的天然标记。水在蒸发和冷凝的过程中,由于水分子中氢、氧同位素具有不同的物理化学特性,会导致不同水体的同位素组成发生变化,这种现象被称为同位素分馏,通过分析不同环境水体中同位素“痕迹”可以示踪其形成及运移方式^[22-27]。

2.2.2 氡同位素示踪原理

氡是一种天然存在的无色无味的惰性气体,具有放射性,产生于铀系衰变由其母体镭衰变产生。 ^{222}Ra 衰变产生反冲作用使得 ^{222}Rn 脱离矿物颗粒表面进入地下水体中,地下水中的氡同位素活度通常比地表水高 2~3 个数量级。只有当地表水中有地下水流入时才能在地表水中检测到氡同位素,研究^[28]表明地表水 ^{222}Rn 活度超过 1 000 Bq/m^3 即为存在地下水入流的有力证据,因此放射性同位素 ^{222}Rn 被认为是示踪地下水与地表水之间水力交换的理想示踪剂^[29]。

2.2.3 线性端元混合模型

利用同位素质量平衡原理,通过比较水体的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差异,可以有效识别供水来源和转化过程。在对 n 种水源进行区分时,通常需要使用 $n-1$ 种示踪剂。为了确保示踪剂选择的精确性,需要考虑多种限制条件。因此,采用二元线性混合模型进行分析,以准确估算各端元的混合占比,从而构建线性端元混合方程^[4-5,14]:

$$\delta_m = f_1\delta_1 + f_2\delta_2 + f_3\delta_3$$
$$f_1 + f_2 + f_3 = 1$$

(1)

其中 δ_m 为混合水体中的同位素含量; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为不同补给水源的 δ ; f_1 、 f_2 、 f_3 分别为不同水源的混合占比。

3 结果与分析

3.1 氢氧稳定同位素组成与盐分含量特征分析

3.1.1 氢氧稳定同位素组成特征

由图 3 可知,水体 $\delta^{18}\text{O}$ 均值从大到小排序为回归湖泊、泡田水、斗沟、支沟、排干、渠、乌加河、地下水, $\delta^2\text{H}$ 均值从大到小排序为回归湖泊、泡田水、斗沟、支沟、排干、渠、乌加河、地下水。地表水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 普遍大于地下水的,说明地下水受到蒸发影响最小,而回归湖泊的水因水源经过汇流、径流、农田灌溉等过程,在此期间会受到强烈蒸发作用的影响,导致同位素过度分馏,从而导致 ^2H 和 ^{18}O 富集^[30-31]。 ^2H 和 ^{18}O 富集趋势基本保持一致,这符合巴彦淖尔市处于干旱半干旱地区,蒸发量大于降水量的实际情况。

降水的同位素组成会随时间与空间的变化而变化,因此每个地区都有反映各自地区降水规律的地区大气降水线(LMWL),且 LMWL 往往与全球大气降水线(GMWL)^[32]有所偏离^[15]。郑淑蕙等^[33]通过分析 8 个地区的降水氢氧稳定同位素组成,得出中国大气降水线为 $\delta^2\text{H}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$;郭鑫等^[34]基于内蒙古及其周

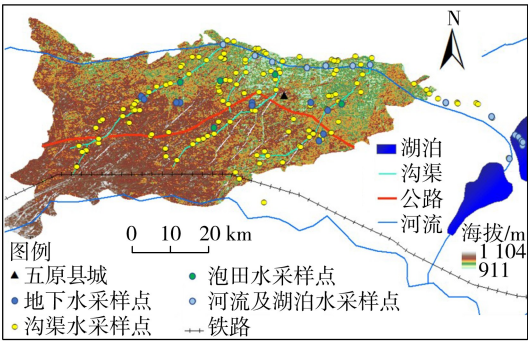


图 2 五原县采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling points in Wuyuan County

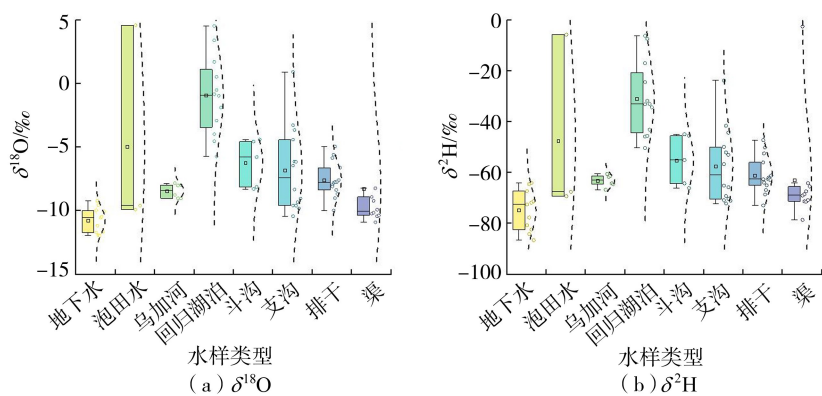


图 3 氢氧稳定同位素组成箱线图

Fig. 3 Box diagram of stable hydrogen and oxygen isotope composition

边 12 个地区的大气降水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,得出内蒙古夏季大气降水线为 $\delta^2\text{H}=7.12\delta^{18}\text{O}-1.64$ ($R^2=0.89$)。本文通过对采集水样(175 个)的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行拟合,得到区域蒸发线(图 4)。由图 4 可知,区域蒸发线明显偏离 LMWL,无论是斜率还是截距都小于 LMWL,这种现象往往出现在干旱半干旱地区或封闭盆地中^[35]。

由图 4 可知,明渠、支沟、斗沟、排干、回归湖泊、泡田水和乌加河这些地表水分布在区域蒸发线附近,说明这些水样具有相似的水源特征,且有紧密的水文联系。内蒙古巴彦淖尔地区年均降水量 170 mm,降水量远小于蒸发量,区域蒸发线斜率 4.15 远小于内蒙古大气降水线斜率 7.12,表明大气降水补给地表水的过程中经历了强烈的蒸发作用,同时地表水体本身在循环过程中也经历了强烈的蒸发作用。地下水分布在 LMWL 线近,说明地下水主要来源是大气降水和深层地下水补给,氢氧稳定同位素组成贫化。地下水与地表水的同位素特征存在显著差异,因此从水的来源角度看地下水与地表水间的水文联系并不紧密,即地下水与地表水的氢氧稳定同位素组成差异反映了它们受到不同水文过程的控制,且存在不同的补给机制。

3.1.2 水体 Ec 与 TDS 含量特征

TDS 在一定程度上可以反映水体在水循环过程中的停留长短与环境特征,因水体运动过程中可溶性矿物不断溶解,水体中的 TDS 含量会随着流动路径与停留时间变长逐渐增大,由此可以大致推断水的运移路径^[36]。地下水 TDS 质量浓度变化范围为 730~2490 mg/L,泡田水为 641~1497 mg/L,支沟为 856~4643 mg/L,斗沟为 759~4053 mg/L,乌加河为 1500~2385 mg/L,排干为 891~4479 mg/L,回归湖泊为 649~8408 mg/L,渠水为 515~5566 mg/L。

由图 5 可知,除泡田水与渠水之外都符合因水体流动冲刷携带土壤盐分以及水分蒸发导致含盐量逐渐增加的基本规律,且水体中的 TDS 与 Ec 表现出相同的变化趋势。水体在经过斗沟、支沟以及排干的过程中 TDS 显著增加,排水沟中水 TDS 含量远大于引灌水 TDS,说明灌溉水体对土壤盐分有淋洗作用。土壤中盐分通过水流的冲刷和携带,有效地从农田转移到灌区的排水系统中,最终被排出灌区,这一过程不仅促进了土壤盐分的再分布,还有助于防止土壤盐碱化。

乌加河 TDS 含量明显高于地下水,也印证了灌溉水在灌区系统中淋洗盐分的作用,将灌区系统中的盐分排

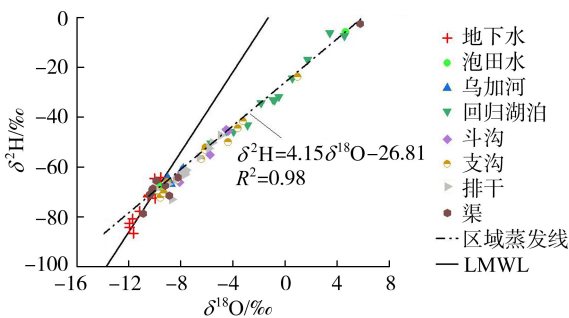


图 4 五原县各采样点氢、氧同位素回归模拟

Fig. 4 Regression simulation of hydrogen and oxygen isotopes at each sampling point in Wuyuan County

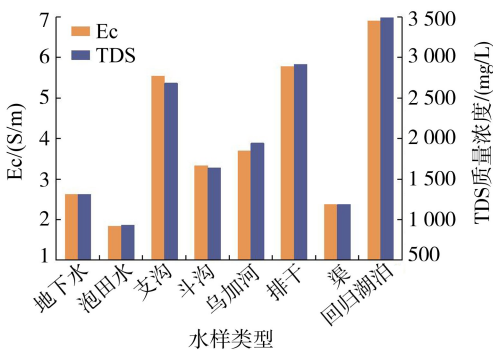


图 5 地表水与地下水的平均 TDS 含量与 Ec

Fig. 5 Average values of TDS and Ec in surface water and groundwater

入乌加河中。同时,通过对乌加河氢氧稳定同位素组成分析,发现蒸发也是导致河水中盐分浓度上升的一个重要因素,淋洗和蒸发作用共同影响了乌加河水体盐度变化。地下水主要补给来源为深层地下水和灌溉水渗漏补给,并且地下水受到蒸发的影响相对较小,因此地下水的 TDS 较小。

3.2 地表水氢氧稳定同位素组成与盐分含量空间变化

3.2.1 氢氧稳定同位素组成空间变化

由图 6 可知,五原县地表水氢氧稳定同位素组成空间分布规律基本一致,灌区的水流从西南部引入,在灌区沟渠网络中的复杂流动过程及植物吸收过程中没有明显的变化规律。但这一过程中水的蒸发作用导致了氢氧同位素的分馏效应,使得灌区西南部形成较高的氢氧同位素值。五原县蒸散发量具有显著季节性差异,春季的 4 月和秋季的 10 月,由于温度较低和植被生长尚未完全开始,蒸散发量相对较低。然而,进入夏季,尤其是 6 月,随着植被生长期的全面展开,蒸散发量显著增加,在 6—8 月达到峰值,此期间正为本文的集中采集期^[6]。五原县作为向日葵的主要种植区,6—8 月为作物生长的旺盛期,农田蒸散发量逐步攀升,月均值介于 200~300 mm,这一生长阶段的蒸散发量的增加,导致了同位素分馏效应的加剧。

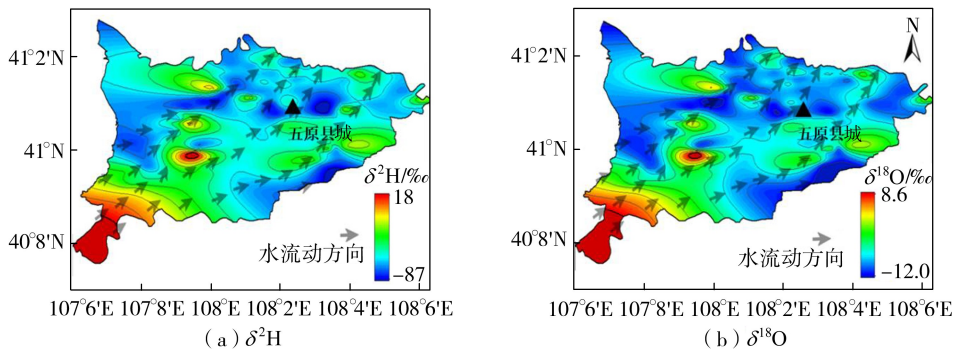


图 6 五原县地表水氢氧稳定同位素组成空间变化

Fig. 6 Changes in composition space of stable hydrogen and oxygen isotopes in surface water of Wuyuan County

在蒸散发量较高的月份,水分通过植被的蒸腾作用和土壤的蒸发作用大量散失,使得留在土壤中的水分逐渐富集重同位素。沟渠中水体理应逐渐富集重同位素,但由图 6 可知,下游比上游的氢氧稳定同位素更加贫化,可能是因为更加贫化的地下水^[6]进入到地表水。

3.2.2 TDS 质量浓度与 Ec 空间变化

由图 7 可知,灌区内地表水 TD 质量浓度 S 与 Ec 空间分布基本一致,地表水沿沟渠流动盐分含量变化不大,在没有作物种植的荒地以及回归湖泊水体盐分含量相对较大。随着灌溉水在灌区内流动,因灌溉水对土壤盐分的淋洗作用以及蒸发影响,水体 TDS 质量浓度应该逐渐增大,但沟渠水 TDS 质量浓度并没有明显的规律,只是荒地和回归湖泊 TDS 质量浓度相对较高,并不完全符合随水体流动盐分逐渐增大的规律,这一结果表明地表水受到地下水补给。

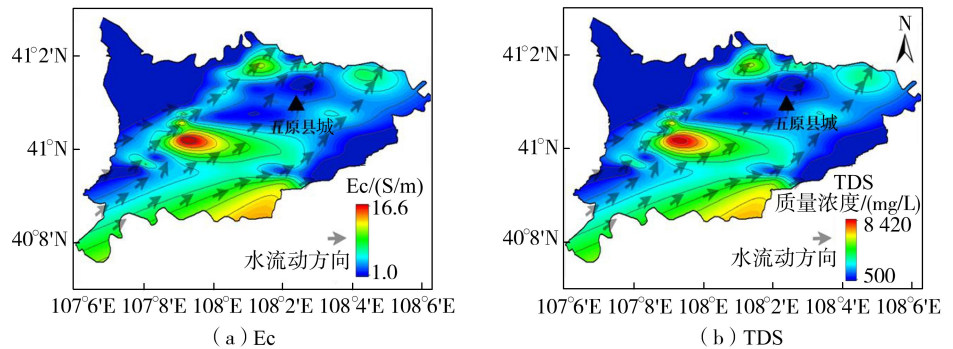


图 7 五原县 TDS 与 Ec 空间变化

Fig. 7 Changes in TDS and Ec in Wuyuan County

3.3 地下水与地表水补给关系

地下水中²²²Rn 活度变化范围为 1 561. 97~6 422. 45 Bq/m³,均值为 3 186. 6 Bq/m³,各采样点间²²²Rn 活度

有明显差异,主要是因为 ^{222}Rn 的活度受水体停留时间与水动力学因素影响,水体停留时间越长,水-岩交换作用越充分, ^{222}Rn 活度也会越高。水动力学因素决定了地下水运移速率和运移时间的长短,也会对 ^{222}Rn 的活度产生影响。在所测得的 8 种水源水体(地下水、渠水、支沟水、斗沟、排干水、回归湖泊、乌加河、泡田水)中,地表水的 ^{222}Rn 活度平均值为 $2\,615.11\text{ Bq/m}^3$,大于 $1\,000\text{ Bq/m}^3$,存在明显的地下水入流情况,从而导致氢氧稳定同位素组成及盐分含量空间分布不规律。

由图 7 和图 8 可知,在灌区内部,地下水补给过程降低了地表水体的 TDS 质量浓度,从而导致 TDS 质量浓度并非沿沟渠流动逐渐递增,表明地下水补给可以调节区域盐分含量,这一发现对于理解灌区水盐循环过程具有重要意义。由于内排水作用,地下水携带着较高的盐分和重同位素从灌溉区向非灌溉区流动,这种横向水盐迁移过程在非灌溉区形成了独特的水化学特征,也可能对当地生态系统和土地利用模式产生长远影响。

由图 9 可知,泡田水与斗沟水样中 E_c 越高相应的 ^{222}Rn 活度也越高,表明在泡田水和斗沟水中,电导率作为衡量溶液中 TDS 质量浓度的指标与 ^{222}Rn 活度之间存在正相关关系。通过对 TDS 质量浓度数据进行分析,发现渠水与地下水的 TDS 质量浓度几乎相同,并且地下水中 ^{222}Rn 活度与 TDS 质量浓度并无直接联系,说明地下水在补给地表水过程中,携带了土壤的浅层含盐水体。

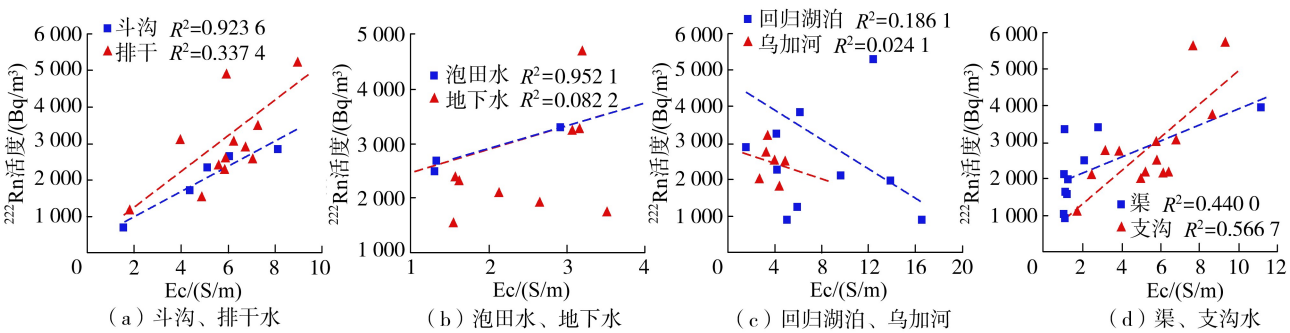


图 9 E_c 与 ^{222}Rn 活度关系分析

Fig. 9 Analysis of relationship between E_c and ^{222}Rn activity

3.4 线性端元混合模型计算

沟渠引水、地表泡田水与地下水间水分转化如图 10 所示,沟渠引水是灌区主要的水分来源,蒸发和蒸腾是主要的水分消耗。本文采集水样期间为夏灌期间,夏灌是为了补充蒸发、蒸腾和渗漏等过程损失的水分,

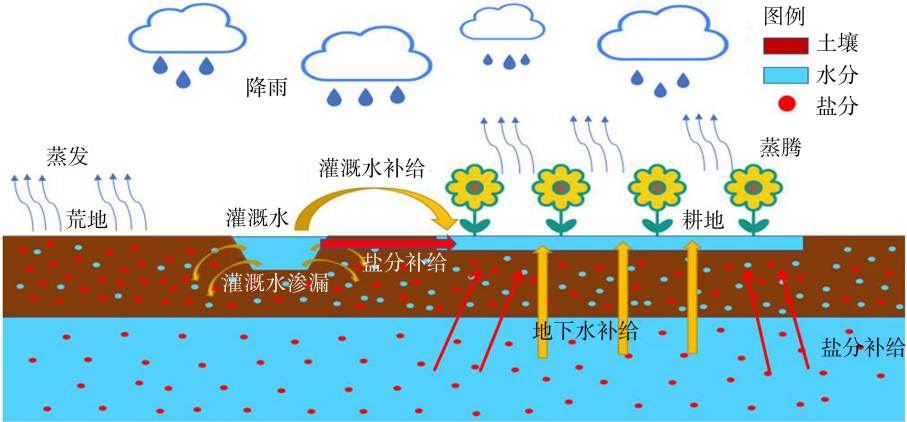


图 10 不同类型水分转化示意

Fig. 10 Schematic diagram of different types of water transformation

确保作物能够得到充足的水分维持生长,会根据多种因素来调整灌溉频率,因此本文不考虑蒸发带来的影响。降雨补给因为蒸发量远远大于降水量,可以忽略不计。

泡田水来源端元为沟渠引水和地下水,地下水、沟渠引水与泡田水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用实际采样所测数据平均值。将各数据代入式(1),计算得泡田水受到沟渠引水、地下水补给的占比分别为65.15%、34.85%(表1)。

表1 沟渠引水、地下水对泡田水的补给比例

Table 1 Proportions of channeled water and groundwater recharge to stagnant water in the land

来源端元	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	补给占比/%		平均补给占比/%
			按 $\delta^{18}\text{O}$ 计算	按 $\delta^2\text{H}$ 计算	
沟渠引水	-67.3539	-9.2199	75.10	55.20	65.15
地下水	-74.7834	-10.7459	24.90	44.80	34.85

根据沟渠引水、地下水对泡田水的补给占比,计算两种水源对泡田水的盐分补给。按照表1的水源补给占比计算泡田水的TDS质量浓度应为801.63 mg/L(沟渠引水和地下水的TDS质量浓度分别为527.5、1314 mg/L),但泡田水的实测TDS质量浓度为656 mg/L(沟渠引水、地下水对泡田水补给的盐分分别占两水源总盐分的53.31%、28.52%),说明有18.17%的盐分在补给泡田水的过程中滞留在灌区土壤中。

4 结 论

- a. 五原县地下水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 基本落到LMWL上,说明地下水的主要补给来源为深层地下水和渗漏水。明渠、支沟、斗沟、排干、回归湖泊、泡田水和乌加河水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 基本落在区域蒸发线上,说明它们具有相同的水源特征,但与地下水的补给来源不同。
- b. 五原县灌区 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、盐分空间分布的非典型模式表明,除了水体流动,生物地球化学过程和补给方式也是影响盐分动态的关键因素。 ^{222}Rn 数据显示五原县地下水补给显著降低了地表水体的盐分浓度。
- c. 沟渠引水和地下水对泡田水的补给占比分别为65.15%、34.85%,但沟渠引水、地下水对泡田水补给的盐分分别占两水源补给总盐分的53.31%、28.52%,有18.17%的盐分在补给过程中滞留在灌区土壤内。
- d. 地下水的作用在灌区水盐平衡中扮演着关键角色,无论是通过内排水还是沟渠排水,地下水的动态都对盐分的分布和迁移产生了显著影响,这一过程不仅调节了灌区水体的盐分浓度,还可能对农业生产和水资源管理产生深远的影响。

参考文献:

[1] PESSARAKLI M. Handbook of plant and crop stress[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

[2] 史海滨,杨树青,李瑞平,等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17. (SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1-17. (in Chinese))

[3] 孙玲玉. 内蒙古河套灌区非点源污染物分布规律及农田排水模拟[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.

[4] JIANG Yao, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Assessment of irrigation performance and water productivity in irrigated areas of the middle Heihe River basin using a distributed agro-hydrological model[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 67-81.

[5] ALIYARI F, BAILEY R T, TASDIGHI A, et al. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 115: 200-210.

[6] EBRAHIMIAN H, NOORY H. Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS-2D[J]. Paddy and Water Environment, 2015, 13(4): 477-485.

[7] XUE Jing, REN Li. Assessing water productivity in the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia by an agro-hydrological model [J]. Irrigation Science, 2017, 35(4): 357-382.

[8] CHANG Xiaomin, GAO Zhanyi, WANG Shaoli, et al. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 447-458.

[9] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.

[10] ŠIMŮNEK J, ŠEJNA M, VAN GENUCHTEN M T. The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in two dimensional variably saturated media, Version 2.0[M]. Golden: Colorado School of Mines, 1998.

[11] VAN DAM J C,HUYGEN J,WESSELING J G,et al. Theory of SWAP version 2. 0:simulation of water flow,solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment[R]. Wageningen:DLO Winand Staring Centre,1997.

[12] CHIEN C P,FANG W T. Modeling irrigation return flow for the return flow reuse system in paddy fields[J]. Paddy and Water Environment,2012,10(3):187-196.

[13] XUE Jingyuan,GUAN Huade,HUO Zailin,et al. Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater[J]. Agricultural Water Management,2017,194:78-89.

[14] WEN Yeqiang,SHANG Songhao,RAHMAN K U,et al. A semi-distributed drainage model for monthly drainage water and salinity simulation in a large irrigation district in arid region[J]. Agricultural Water Management,2020,230: 105962.

[15] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 738-747. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing, WEN Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 738-747. (in Chinese))

[16] 孙从建, 周思捷, 陈亚宁, 等. 中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 111-121. (SUN Congjian, ZHOU Sijie, CHEN Yaning, et al. Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 111-121. (in Chinese))

[17] 茅昌平, 肖衡, 王帅, 等. 三峡库区表层沉积物有机碳、氮同位素特征及对有机质来源的指示[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 160-168. (MAO Changping, XIAO Heng, WANG Shuai, et al. Characteristics of organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediment of Three Gorges Reservoir region and their implications for sources of organic matter[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 160-168. (in Chinese))

[18] 陈建生, 季弼宸, 刘震, 等. 内蒙古高原岱海接受远程深循环地下水补给的环境同位素及水化学证据[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 521-530. (CHEN Jiansheng, JI Bichen, LIU Zhen, et al. Isotopic and hydro-chemical evidence on the origin of groundwater through deep-circulation ways in Lack Daihai region, Inner Mongolia Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 521-530. (in Chinese))

[19] LIU Xiangmei, CHEN Jiaqi, ZHANG Qiwen, et al. Floating on groundwater: insight of multi-source remote sensing for Qaidam basin[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121513.

[20] WANG Wang, CHEN Jiaqi, CHEN Jiansheng, et al. Basalt and dune: critical factors in desert water resource development[J]. ACS ES & T Water, 2024, 4(8): 3190-3199.

[21] 张晓洁, 徐晓涵, 相湛昌, 等. 黄河下游地下水中镭氢同位素的分布及影响因素研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 1-7. (ZHANG Xiaojie, XU Xiaohan, XIANG Zhanchang, et al. Distribution characteristics and influence factors of radium and radon isotopes in the lower reaches of the Yellow River[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(1): 1-7. (in Chinese))

[22] 詹泸成, 陈建生, 黄德文, 等. 长江干流九江段与鄱阳湖不同季节的同位素特征[J]. 水利学报, 2016, 47(11): 1380-1388. (ZHAN Lucheng, CHEN Jiansheng, HUANG Dewen, et al. Stable isotope characteristics in the Poyang Lake region at Jiujiang section of the Yangtze River in different seasons[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(11): 1380-1388. (in Chinese))

[23] 饶文波, 李垚炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. (RAO Wenbo, LI Yaowei, TAN Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125. (in Chinese))

[24] 廖雯, 杨海娇, 雷金平, 等. 稳定同位素在干旱内陆河流域水文循环研究中的应用[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(11): 176-178. (LIAO Wen, YANG Haijiao, LEI Jinping, et al. Application of stable isotope in the study of hydrologic cycle in arid inland river basin[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, 11(11): 176-178. (in Chinese))

[25] 赵超, 张翔宇, 沈凯琦, 等. 东南沿海流域河水氢氧同位素时空变化特征[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 19-21. (ZHAO Chao, ZHANG Xiangyu, SHEN Kaiqi, et al. Spatiotemporal variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in runoff of southeast coastal watersheds[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12): 19-21. (in Chinese))

[26] 卢小慧, 吴潮峰, 龚绪龙, 等. 基于氢同位素的平原湖荡枯水期湖水-地下水补排通量[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 939-950. (LU Xiaohui, WU Chaofeng, GONG Xulong, et al. Lake-groundwater recharge fluxes during dry season in plain lakeland based on radon isotopes[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 939-950. (in Chinese))

[27] 周睿, 曲文静, 王超月, 等. 南大港湿地湖水蒸发及地表水地下水转化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1241-1250. (ZHOU Rui, QU Wenjing, WANG Chaoyue, et al. Evaporation of lake water and exchange of surface water and groundwater in the Nandagang Wetland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1241-1250. (in Chinese))

[24] 王洁,李金泽,王子瞳,等.改进鲸鱼优化 LightGBM 的可解释性心脏病风险预测模型[J].北京邮电大学学报,2023,46(6):39-45. (WANG Jie,LI Jinze,WANG Zitong,et al. An interpretable prediction model for heart disease risk based on improved whale optimized LightGBM[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications,2023,46(6):39-45. (in Chinese))

[25] 高永涛,朱强,吴顺川,等.基于 AVOA-XGBoost 模型的岩爆预测研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):151-157. (GAO Yongtao,ZHU Qiang,WU Shunchuan,et al. Rockburst prediction study based on AVOA-XGBoost model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),2023,51(12):151-157. (in Chinese))

[26] 牛传乐,李芳,任顺,等.基于非洲秃鹫算法优化卷积神经网络的重叠峰解析方法[J].科学技术与工程,2024,24(16):6592-6599. (NIU Chuanle,LI Fang,REN shun,et al. Overapping peak resolution method fox oplimizing convolutional neural network bxased on the Africa vulture oplimization algorithm[J]. Scieene Technology and Engineering,2024,24(16):6592-6599. (in Chinese))

[27] 罗兴隆,贺兴时,周洁,等.基于非洲秃鹫优化算法改进的密度峰值聚类[J].山东大学学报(理学版),2024,59(1):46-55. (LUO Xinglong,HE Xingshi,ZHOU Jie,et al. Improved density peak clustering approach based on African vultures optimization algorithm[J]. Journal of Shandong University(Natural Science),2024,59(1):46-55. (in Chinese))

[28] GUOLIN K,MENG Q,THOMAS F,et al. LightGBM; a highly efficient gradient boosting decision tree[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural InformationProcessing Systems. New York:Curran Associates Inc. ,2017:3149-3157.

[29] 莫坤,王娜,李恒吉,等.基于 LightGBM 的网络入侵检测系统[J].信息安全研究,2019,5(2):152-156. (MO Kun,WANG Na,LI Hengji,et al. Network intrusion detection system model based on LightGBM[J]. Journal of Information Security Research,2019,5(2):152-156. (in Chinese))

[30] ABDOLLAHZADEH B,GHAREHCHOPOGH F S,MIRJALL S. Africanvultures optimization algorithm; a new natureinspired metaheuristic algorithm for global optimizationproblems[J]. Computers & Industrial Engineering,2021,158:107408.

[31] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

(收稿日期:2024-07-30 编辑:胡新宇)

(上接第 33 页)

[28] 余钟波,李敏娟,刘芸辰,等.基于氡同位素的河水与地下水水力交换研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):8-13. (YU Zhongbo,LI Minjuan,LIU Yunchen,et al. Study on hydraulic exchange of river water and groundwater based on radon isotope[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(1):8-13. (in Chinese))

[29] 骆欢,衣鹏.基于氡同位素的闸塘渗漏检测研究[J].人民长江,2017,48(24):101-105. (LUO Huan,YI Peng. Study on sluice leakage detection based on Rn isotope[J]. Yangtze River,2017,48(24):101-105. (in Chinese))

[30] 焦鹏程,王弭力,刘成林.新疆罗布泊盐湖卤水的氚同位素特征及其地质意义[J].核技术,2004,27(9):710-715. (JIAO Pengcheng,WANG Mili,LIU Chenglin. Characteristics and origin of tritium in the potassium-rich brine in Lop Nur,Xinjiang[J]. Nuclear Techniques,2004,27(9):710-715. (in Chinese))

[31] 巩同梁,田立德,刘东年,等.羊卓雍湖流域湖水稳定同位素循环过程研究[J].冰川冻土,2007,29(6):914-920. (GONG Tongliang,TIAN Lide,LIU Dongnian,et al. A preliminary study of stable isotope cycle processes in lake water in the Yamzho Lake Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(6):914-920. (in Chinese))

[32] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science,1961,133(3465):1702-1703.

[33] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄.我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J].科学通报,1983,28(13):801-806. (ZHENG Shuhui,HOU Fagao,NI Baoling. Hydrogen and oxygen stable isotopes of atmospheric precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin,1983,28(13):801-806. (in Chinese))

[34] 郭鑫,李文宝,杜蕾,等.内蒙古夏季大气降水同位素特征及影响因素[J].中国环境科学,2022,42(3):1088-1096. (GUO Xin,LI Wenbao,DU Lei,et al. Characteristics and influence factors for the hydrogen and oxygen isotopic of precipitation in Inner Mongolia[J]. China Environmental Science,2022,42(3):1088-1096. (in Chinese))

[35] 李文鹏,郝爱兵,郑跃军,等.塔里木盆地区域地下水环境同位素特征及其意义[J].地学前缘,2006,13(1):191-198. (LI Wenpeng,HAO Aibing,ZHENG Yuejun,et al. Regional environmental isotopic features of groundwater and their hydrogeological explanation in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers,2006,13(1):191-198. (in Chinese))

[36] 甄志磊,李畅游,李文宝,等.内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系[J].湖泊科学,2014,26(6):916-922. (ZHEN Zhilei,LI Changyou,LI Wenbao,et al. Characteristics of environmental isotopes of surface water and groundwater and their recharge relationships in Lake Dali Basin[J]. Journal of Lake Sciences,2014,26(6):916-922. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-05 编辑:刘晓艳)