

任文,谢坤,李中阳,刘安能,雍蓓蓓,张志新,丁大伟

引用本文:

任文,谢坤,李中阳,刘安能,雍蓓蓓,张志新,丁大伟.豫东农田生态系统不同水体水质长期变化规律及影响因素分析[J].农业资源与环境学报,2023,40(6):1296-1307.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0665

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于SDI校正指数的滨海平原盐渍化生态风险评价

潘肖燕, 崔江慧, 杨江燕, 关瑜, 孟泽, 刘田书, 门明新, 陈影 农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 709-718 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0286

不同评价方法在地下水源水质评价中的应用——以天津市为例

赵兴华,李泽利,贾冰莹,王亚舒,肖传宁,高锴,梅鹏蔚,张震 农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 686-692 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0422

节水改造对沈乌灌域不同地貌浅层地下水埋深的影响

韩天凯,丁雪华,潘春洋,刘月 农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 620-629 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0352

基于SWAP模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析

曾揭峰, 刘霞, 李就好, 夏玉红, 王丽萍 农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 540-549 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0226

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧,李子玉,白志贵,刘建国 农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914-923 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业资源与环境学报 2023, 40(6): 1296-1307

任文,谢坤,李中阳,等.豫东农田生态系统不同水体水质长期变化规律及影响因素分析[J].农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1296-1307. REN W, XIE K, LI Z Y, et al. Long-term dynamic quality of flowing surface water and shallow groundwater in the agricultural ecosystem of eastern Henan and analyses of influencing factors[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1296-1307.

# 豫东农田生态系统不同水体水质 长期变化规律及影响因素分析

## 任文1,2,谢坤1,2,李中阳1,2,刘安能1,2,雍蓓蓓1,2,张志新3,丁大伟1,2,4\*

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002;2.河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站/国家农业环境商丘观测实验站/国家农业绿色发展长期固定观测商丘试验站,河南 商丘 476000;3.西北农林科技大学草业与草原学院,陕西 杨凌 712100;4.中国农业科学院研究生院,北京 100081)

摘 要:为探究农田生态系统不同水体间水质状况差异特征及其与降雨量、地下水水位等因素的关系,本研究于2010—2020年对 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站周边4处流动地表水及5处浅层地下水进行监测,采用描述性统计及时间序列 分析方法,分析该区域两种水体水质状况长期变化规律及其影响因素。结果表明:更新能力较差的浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、 HCO5、SO<sup>2+</sup>、CI<sup>-</sup>含量及电导率通常高于流动地表水,降雨量增加时伴随的地下水位升高使表层土壤中的盐分离子更容易向地下水 中迁移,进而导致两种水体水质的差异增大。在为期10年的监测中,所有离子均出现了明显的峰值,其中Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sup>2+</sup>于2012年 3月在流动地表水中率先达到最大值,K<sup>+</sup>于2011年9月在浅层地下水中率先达到最大值。不同时期两种水体的水化学类型相似 程度较高,季节因素对水体中不同离子含量的周期性变化影响较小,而降雨及地下水位长期变化趋势是影响水化学类型和离子 变化趋势的主要因素。当降雨量增加和地下水位上升时,浅层地下水中SO<sup>2+</sup>和CI<sup>-</sup>含量易超过《地下水质量标准》(GB/T 14848— 2017) IV类临界值,此时不宜选择浅层地下水作为灌溉水源。本研究证实了豫东地区典型农田生态系统水质变化与降雨和地下 水位的长期变化规律紧密相关,可为该地区农田环境水质风险管理及农业生产用水选择提供理论支撑。

关键词:豫东;流动地表水;浅层地下水;水质状况

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)06-1296-12 doi: 10.13254/j.jare.2022.0665

# Long-term dynamic quality of flowing surface water and shallow groundwater in the agricultural ecosystem of eastern Henan and analyses of influencing factors

REN Wen<sup>1,2</sup>, XIE Kun<sup>1,2</sup>, LI Zhongyang<sup>1,2</sup>, LIU Anneng<sup>1,2</sup>, YONG Beibei<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhixin<sup>3</sup>, DING Dawei<sup>1,2,4\*</sup>

(1. Institute of Farmland Irrigation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu / Shangqiu Observation and Experimental Station of National Agricultural Environment/National Long-term Agricultural Green Development Experiment and Observation Station, Shangqiu 476000, China; 3. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Our research is aimed at exploring quality differences in different water sources, and the quality influence from precipitation, shallow groundwater depth, and other factors in an agricultural ecosystem. Samples of flowing surface water and shallow groundwater were collected from four and five locations near the National Agro-ecological System Observation and Research Station of Shangqiu in Henan

收稿日期:2022-09-22 录用日期:2022-12-08

作者简介:任文(1994—),男,内蒙古集宁人,硕士,研究实习员,从事农田环境方向的研究。E-mail:renwen0116@foxmail.com

<sup>\*</sup>通信作者:丁大伟 E-mail:dingdawei@caas.cn

基金项目:中国农科院基本科研业务费专项院级统筹项目(Y2022LM29);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IFI2023-18)

Project supported: Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund (Y2022LM29); The Special Program for Fundamental Scientific Research Operation of Central-level Public Welfare Scientific Research Institutes(IFI2023-18)

Province to monitor water quality from 2010 to 2020. Quality of these two water sources was studied as a dynamic process to identify influencing factors using descriptive statistics and a time series analysis method.  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $HCO_5$ ,  $SO_4^2^-$  and  $CI^-$  content and electrical conductivity were usually higher in poorly renewed shallow groundwater than in flowing surface water. Rises in the underground water table caused by increased precipitation could promote salt ion migration from top soil to groundwater, thereby amplifying discrepancies between these two kinds of water. Spanning 10 years of monitoring, peak values were observed for all ions, during which  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  and  $SO_4^{2-}$  in flowing surface water and  $K^+$  in shallow groundwater reached their maxima in March 2012 and September 2011 respectively. The hydrochemical types of these two waters were consistently similar over time. Although seasonal variation exerted less influence on periodical ion content changes, the long-term dynamic interaction between precipitation raised the water table, shallow groundwater  $SO_4^{2-}$ , and  $CI^-$  levels could easily exceed the threshold for agricultural production suggested by *Standard for Groundwater Quality* (GB/T 14848—2017), rendering it unsuitable for irrigation. This study confirmed that long-term quality in flowing surface water and shallow groundwater was dynamically influenced by long-term changes in precipitation and groundwater depth in a typical agricultural ecosystem in eastern Henan, which can provide a reference for water quality risk management in farmland environments and water source selection in local agriculture production.

Keywords: eastern Henan; flowing surface water; shallow groundwater; water quality

豫东地区是我国重要的粮食主产区,其种植方式 主要为冬小麦-夏玉米连作,区域农田土壤存在次生 盐碱化的潜在风险<sup>[1]</sup>,有研究表明土壤次生盐碱化的 形成与降雨及地下水位变化密切相关<sup>[2-3]</sup>,因此当地 健康的水质状况对农业生产具有至关重要的意义。

土壤中离子迁移是影响水质状况的重要因素,而 离子迁移规律、迁移途径(如地表径流曲及淋溶过 程<sup>[5]</sup>)与降雨量、地下水位及离子自身特性密切相关。 有研究表明,降雨量增加会加剧土壤盐分的流失进而 影响周边水体。但不同离子迁移规律存在明显差 异, Plevsier 等<sup>[7]</sup>指出, 在降雨量相同的条件下, 土壤中 离子流失速率表现为K\*<Ca2+、Mg2+<Na+,而迁移规律 不同必然会影响周边水体中的离子含量;同时,降雨 量会增强土壤淋溶作用,进而使地下水矿化程度增 加<sup>[8]</sup>。地下水埋深同样会影响水体质量,地下水位下 降不利于土壤中盐分迁移,导致水体受到的影响减 弱<sup>[9]</sup>。因此,降雨量和地下水位会共同影响水体中的 离子含量。不同类型水体中离子浓度存在较大差异 且这种差异会随时间而发生改变。李书鉴等<sup>101</sup>发现, 地表水和浅层地下水 NO3和 HCO3浓度存在显著差 异。李平等凹在豫东地区的研究中发现,丰水期地下 水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>含量均明显高于枯水期。然而不 同类型水体中离子含量与降雨量及地下水位间关系 却鲜有研究。此外,水体中离子含量是影响水质状况 的重要因素,张岩等凹的研究表明河南平原浅层地下 水存在总溶解固体、总硬度、Mn、"三氮"、Fe、氯化物 以及硫酸盐超标等问题,使得当地环境存在严重安全 隐患。因此,长期监测农田生态系统中水质状况并分

析其来源对农业生产和农业环境安全具有重要的意义,可为改善当地农业生产环境和预防次生盐碱化提供一定的理论依据。

目前,豫东农田环境中不同类型水体中各离子长 期变化过程及其对降雨和地下水位的响应规律有待 进一步研究。本研究利用2010—2020年监测数据,对 豫东平原农田地区不同类型水体水质状况进行了差 异性分析,通过比较各离子的变化规律,判断引起其变 化的主要影响因素,以期揭示区域农业生产中水质状 况变化规律,进而选择适宜的农业灌溉用水策略。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

豫东地区是黄淮平原农田生态系统类型的典型 代表,属暖温带半干旱、亚湿润季风气候。玉米生长 季为6月上旬至9月下旬,小麦生长季为10月中旬至 次年6月上旬。以河南省商丘市西北方向12km范围 内典型农田作为观测区域(图1),当地多年平均降水 量为708 mm,年蒸发量为1735 mm,年平均气温 13.9℃,≥0℃积温在4723℃以上,无霜期206 d左 右。该区域平均海拔52 m,地貌类型为古黄河背河 洼地、决口扇形地和河间微倾斜平地,具有典型的黄 河泛滥区特征,大地貌相对平坦,微地形略有起伏,自 西北向东南有1/5000~1/7000的坡降。研究区内地下 水资源较丰富(近年来每年都引用黄河水补充地下 水),以地下水作为农业生产的主要灌溉水源。土壤 类型主要为黄河沉积物发育的潮土,并伴有部分盐 土、碱土、沙土和沼泽土的交错分布。

#### 农业资源与环境学报·第40卷·第6期·卷终



图 1 商丘市农田水体取样地点布置图 Figure 1 Layout of agricultural water sample collection site in Shangqiu

选择王庄站区调查点(115°36′03″E,34°30′52″ N)、朱楼站区调查点(115°34′07″E,34°31′30″N)、关 庄站区调查点(115°35′07″E,34°30′30″N)、陈菜园 站区调查点(115°32′38″E,34°31′18″N)及张大庄站 区调查点(115°36′03″E,34°30′54″N)作为浅层地下 水(Shallow groundwater)长期定位观测点,而侯庄闸 (115°34′23″E,34°31′59″N)、郑阁水渠(115°32′43″ E,34°33′45″N)、郑阁水库(115°33′12″E,34°34′35″ N)及邓斌口(115°35′39″E,34°29′39″N)作为流动地 表水(Flowing surface water)长期定位观测调查点。 气象数据由商丘站气象观测场(115°35′32″E,34°31′ 12″N)提供。

#### 1.2 指标测定及方法

1.2.1 降雨量

2010年1月至2020年12月期间,利用雨量筒人 工观测日降雨量数据(mm),通过累加日降雨量得到 月降雨量,公式为:

$$P_{\text{month}} = \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{1}$$

式中: $P_{\text{month}}$ 表示月降雨量,mm; $P_i$ 表示日降雨量,mm; n表示当月降雨天数。 1.2.2 地下水埋深

2010年1月至2020年12月,采用测量尺测定浅 层地下水埋深(m),每10d测定一次用以计算月平均 地下水埋深。

$$G_{\text{month}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_i}{n} \tag{2}$$

式中:G<sub>month</sub>表示月平均地下水位埋深,m;G<sub>i</sub>表示每10 d测得的地下水埋深,m;n表示地下水埋深测定次数。 1.2.3 水质指标

2011—2020年期间,于每年旱季(2、3月或4月) 及雨季(8月或9月)使用专用取样水桶分别对浅层 地下水、流动地表水取样,并于2h内放入冰柜(-4℃) 待测。

水体矿化度按照《矿化度的测定(重量法)》(SL 79—1994)测定;pH按照《水质 pH值的测定电极法》 (HJ 1147—2020)测定;Ca<sup>2+</sup>及Mg<sup>2+</sup>按照《水质钙和镁 总量的测定 EDTA滴定法》(GB/T 7477—1987)测定; K<sup>+</sup>(火焰光度法)、Na<sup>+</sup>(火焰光度法)、CO<sup>3-</sup>(双指示剂-中和滴定法)及HCO<sup>3</sup>(双指示剂-中和滴定法)按照 《食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538—2016)测定;Cl<sup>-</sup>按照《水质氯化物的测定 硝酸 银滴定法》(GB/T 11896—1989)测定;SO<sup>2-</sup>按照《水质 硫酸盐的测定 重量法》(GB 11899—1989)测定;全氮 按照《水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光 光度法》(HJ 636—2012)测定;全磷按照《水质总磷的 测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893—1989)测定。

#### 1.3 数据分析

通过对时间序列进行分解,可分别探究事件趋势 性及周期性变化<sup>[13]</sup>。时间序列分解模型表达式为:

*y*=*T*+*P*+η+ε (3) 式中:*T*、*P*、η及ε分别表示趋势项、周期项、平稳随机 项及误差项。

使用R语言(版本 3.6.2)stats包对降雨量、地下水 埋深、pH、电导率及离子浓度等各项指标数据进行时 间序列分解,分析 2010—2020年期间各指标发展趋势 (T)及其关联性,并探究周期性(P)对各指标的影响。

运用 SPSS 19.0 统计软件,分别对流动地表水及 浅层地下水中 pH、电导率、全氮、全磷及 8 种离子在 α=0.05 显著度水平上进行独立样本 t 检验(t-test),对 浅层地下水及流动地表水中不同离子进行相关性检 验(Pearson 相关系数)。使用 Excel 进行绘图,数据用 平均值±标准误表示,热力图使用 R 语言 ggplot2 包绘

— 1298 —

制用以表示不同离子峰值出现的时期。使用 Origin 9.1 绘制 piper 图。

### 2 结果与分析

#### 2.1 降雨量、地下水埋深变化及其周期性分析

观测期间内降雨量存在年际和月际差异(图 2A)。2010—2020年年降雨量的分布范围为570.6~ 911.8 mm,降雨量主要集中在7—9月,占全年降雨量 的32.7%~78.2%,整个观测期内月降雨量的平均值为 63.6 mm;2012年7—9月累计降雨量高达613.5 mm, 而在2019年7—9月累计降雨量最少,仅为256.7 mm。2010—2020年间最大月降雨量变化范围为 146.1~471.6 mm。通过时间序列降雨趋势值可知, 2013年2月—2014年11月降雨趋势值明显低于其他 时期,此期间降雨趋势值最小仅为45.9 mm;而2016 年5月—2019年1月降雨趋势值高于其他时期,在 2018年3月达到最大(83.7 mm)。由周期性分析(图 2C)得出,降雨量在8月时最大(+119.8 mm),12月时 最小(~51.9 mm)。 地下水埋深的最大值通常出现在每年的6—7月 (图2B)。研究期间内,地下水埋深平均为4.1 m,最小 值为0.9 m(2010-09),最大值为7.8 m(2015-06)。由地 下水埋深变化(图2B橙色曲线)分析可得,2010—2020 年间地下水埋深表现为先上升后下降的趋势,在 2014年6月地下水埋深趋势值达到最大(5.9 m),随 后地下水埋深开始逐步降低,但截至2018年8月仍高 于地下水埋深平均值。从地下水埋深的周期性(图 2D)分析可得,地下水埋深在每年的6月份变化最大 (1.9 m),表明此时地下水位通常最低。

#### 2.2 流动地表水和浅层地下水水质变化特征

2.2.1 pH和电导率差异性、周期性及变化趋势分析

浅层地下水 pH 通常要低于流动地表水(图 3A), 在 2011 年 4 月、2012 年 3 月、2013 年 3 月、2013 年 9 月、2014 年 3 月、2018 年 9 月—2020 年 9 月,浅层地下 水 pH 显著低于流动地表水(P<0.05),为流动地表水 pH 的 79.0%~96.0%。而在 2014 年 9 月—2018 年 3 月, 流动地表水与浅层地下水间 pH 差距范围仅为-0.16~ 0.24。pH 受周期性影响较小,且流动地表水的变化



PR、PR-T、GWD及GWD-T分别表示月降雨量、月降雨量趋势、地下水埋深及地下水埋深趋势。下同。 PR,PR-T,GWD, and GWD-T were monthly precipitation, monthly precipitation tendency, groundwater depth, and groundwater depth tendency, respectively. The same below.

图2 降雨量及地下水埋深动态变化及周期性分析

Figure 2 Precipitation and groundwater depth dynamic change and seasonal analysis

http://www.aed.org.cn

农业资源与环境学报·第40卷·第6期·卷终



FSW和SGW分别表示流动地表水及其变化趋势和浅层地下水及其变化趋势;\*表示二者存在显著差异(P<0.05);不同颜色水平虚线表示流动地表水及浅层地下水在整个研究期间内的平均值。下同。

FSW and SGW represent flowing surface water and shallow groundwater; \* represents significant difference between two treatments (P<0.05). Different horizontal color dash lines represent the mean values of flowing surface water and shallow groundwater in the whole experimental period. The same below.

图 3 不同水体中 pH 及电导率(25 ℃)动态变化

Figure 3 Dynamic change of the pH and conductivity (25 °C) values of flowing surface water and shallow groundwater

幅度小于浅层地下水(表1)。

与 pH 不同,浅层地下水电导率通常要高于流动 地表水(图 3B),尤其在 2011 年 4 月、2011 年 9 月、 2012 年 3 月、2013 年 9 月、2014 年 3 月、2018 年 9 月— 2019 年 9 月及 2020 年 9 月,二者存在显著差异(P< 0.05),流动地表水电导率仅为浅层地下水的 25.2%~ 47.8%。在 2020 年 9 月,流动地表水与浅层地下水间 电导率差距达到最大,为2 466.7 μS·cm<sup>-1</sup>。电导率受 周期性影响同样较小,流动地表水与浅层地下水变化 频率一致,且流动地表水的变化幅度小于浅层地下水 (表 1)。

2.2.2 全氮和全磷差异性、周期性及变化趋势分析

2011年9月—2012年9月,流动地表水中全氮含量显著低于浅层地下水,此时仅为浅层地下水的 12.1%~49.8%(图4A)。而在2013年3月—2017年8 月,浅层地下水和流动地表水中全氮含量均较低,二

#### 表1 水质状况指标周期性变化分析

Table 1 Seasonal change analysis of water quality

指标 Index	浅层地下水 Shallow groundwater		流动地表水 Flowing surface water	
	旱季 Dry season	雨季 Rainy season	旱季 Dry season	雨季 Rainy season
pН	-0.060 64	0.060 64	-0.008 96	0.008 96
电导率/(µS·cm <sup>-1</sup> )	146.921 1	-146.921 1	37.901 1	-37.901 1
全氮/(mg•L <sup>-1</sup> )	-1.294 91	1.294 91	-0.035 48	0.035 48
全磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	-0.074 11	0.074 11	0.069 98	-0.069 98
$Ca^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	2.417 15	-2.417 15	5.356 88	-5.356 88
$Mg^{2+}/(mg \cdot L^{-1})$	4.188 87	-4.188 87	-1.048 52	1.048 52
$K^{+}/(mg \cdot L^{-1})$	-1.209 06	1.209 06	0.422 31	-0.422 31
$Na^{+}/(mg \cdot L^{-1})$	18.102 1	-18.102 1	11.622 8	-11.622 8
$\mathrm{HCO}_{3}^{}/(\mathrm{mg}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{L}^{1})$	22.406 7	-22.406 7	1.577 03	-1.577 03
$CO_3^{2-}/(mg \cdot L^{-1})$	2.460 86	-2.460 86	4.254 92	-4.254 92
$SO_4^{2-}/(mg \cdot L^{-1})$	-5.738 75	5.738 75	-2.538 88	2.538 88
$Cl^{-}/(mg \cdot L^{-1})$	-10.617 7	10.617 7	-20.350 9	20.350 9



Figure 4 Dynamic change of total nitrogen and total phosphorus contents in flowing surface water and shallow groundwater

http://www.aed.org.cn

者间差距范围仅为-0.40~1.40 mg·L<sup>-1</sup>。在2018年3 月—2020年9月,二者间差距开始增大,流动地表水 水体中全氮含量仅为浅层地下水的16.7%~72.7%,在 2018年9月和2020年9月显著低于浅层地下水。在 周期性分析(表1)中发现,不同水体类型中全氮周期 性变化同步,流动地表水中全氮波动幅度通常小于浅 层地下水。

水体中全磷含量与水体类型关系较弱,在2011 年4月—2015年3月和2018年3月—2020年9月水体 中全磷含量极低,而在2015年9月—2017年8月,流 动地表水中全磷含量范围为0.4~3.5 mg·L<sup>-1</sup>,浅层地 下水中的范围为0.4~2.2 mg·L<sup>-1</sup>(图4B)。在周期性分 析(表1)中发现,不同水体类型中全磷周期性变化不 同步,且全磷波动幅度相差不大。

#### 2.2.3 各离子差异性、周期性及变化趋势分析

Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>与水体硬度密切相关,而在本研究中 两种离子受水体类型影响较大,浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>含量通常高于流动地表水(图5A、图5B)。在 2011年4月—2012年9月、2013年9月—2014年9月 和2019年2月—2020年9月,浅层地下水Ca<sup>2+</sup>含量显 著高于流动地表水(P<0.05),在整个研究周期内二者 间差异最大值和最小值分别为139.0、4.2 mg·L<sup>-1</sup>。而 不同水体类型中Mg<sup>2+</sup>存在显著差异的时间段分别为 2011年4月—2011年9月、2012年9月—2015年3月、 2016年3月、2017年3月和2018年3月—2020年9月 (P<0.05),在整个周期内二者间差异最大值和最小值 分别为132.7、15.1 mg·L<sup>-1</sup>。

在 2012 年 9月 — 2014 年 3月 和 2016 年 3月 — 2020年3月,浅层地下水中K\*含量明显低于流动地表 水,仅为流动地表水的18.7%~76.7%(图5C)。而在 2011年9月—2012年3月、2014年9月、2015年9月和 2020年9月,浅层地下水中K\*含量均值远高于流动地 表水,流动地表水中K\*含量仅为浅层地下水的 23.6%~90.3%。在2015年3月、2016年3月—9月及 2017年8月二者K<sup>+</sup>含量存在显著差异(P<0.05),表明 水体类型对K\*含量影响较大。观测期间,浅层地下水 中Na<sup>+</sup>含量通常高于流动地表水(图5D),在2014年3月 和2016年9月流动地表水中Na<sup>+</sup>含量高于浅层地下水, 但二者间差距仅为0.1~1.9 mg·L<sup>-1</sup>。在2011年4月— 2012年9月、2017年8月—2018年9月、2019年9月和 2020年9月,二者间存在显著差异(P<0.05),差距范围 分别为 20.4~1 266.7、22.0~174.8、139.0 mg・L<sup>-1</sup>和  $270.2 \text{ mg} \cdot L^{-1}$  °

HCO<sub>3</sub>和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>会对水体碱度产生影响,在水体中的含量会随时间推移而发生改变(图 5E、图 5F),除2015年9月外,浅层地下水 HCO<sub>3</sub>含量均高于流动地表水,二者间差距范围为18.9~719.4 mg·L<sup>-1</sup>。除2015年9月、2016年9月、2017年8月及2018年9月外,其余时期二者 HCO<sub>3</sub>含量均存在显著差异(P<0.05)。而不同水体中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量变化规律不明显,在2011年9月、2012年9月—2015年3月、2016年3月—2018年3月,浅层地下水 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量高于流动地表水,在2011年9月、2012年9月、2014年9月、2016年9月和2020年9月、二者间 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量差距分别为15.8、8.6、9.4、8.2 mg·L<sup>-1</sup>和14.0 mg·L<sup>-1</sup>,且存在显著差异(P<0.05)。

浅层地下水中SO<sup>2</sup>和CI<sup>-</sup>含量多数时期高于流动 地表水(图5G、图5H)。在2011年9月、2012年9月、 2013年3月、2013年9月、2015年3月和2016年3月, 二者间SO<sup>2</sup>含量存在显著差异(P<0.05),浅层地下水 和流动地表水SO<sup>2</sup>含量最大值分别为1667.3 mg·L<sup>-1</sup> 和681.3 mg·L<sup>-1</sup>。对CI<sup>-</sup>含量而言,在2011年9月、 2012年3月、2014年3月、2019年2月、2019年9月和 2020年9月,浅层地下水显著高于流动地表水(P<0.05),二者间最大差距和最小差距分别为248.4 mg·L<sup>-1</sup>

流动地表水及浅层地下水水体中离子变化情况 受季节周期性影响较弱(表1),说明干、湿两季的作 用有限,而其长期趋势变化明显,部分离子(Ca<sup>2+</sup>、 Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及 Cl<sup>-</sup>)变化趋势不同步但存在一 定相似性。

# 2.3 流动地表水和浅层地下水水质指标关联性分析2.3.1 水化学类型分析

2010—2013年,流动地表水水化学类型(图6A) 主要为Ca-Cl·HCO<sub>3</sub>、Na-Cl、Na-SO<sub>4</sub>及Mg·Ca-SO<sub>4</sub>,而 在2013年3月—2016年9月水化学类型主要为Na· Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl· HCO<sub>3</sub>、Na-SO<sub>4</sub>、Na·Ca-SO<sub>4</sub>、Mg·Ca-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、 Na-Cl·SO<sub>4</sub>、Na·Ca·Mg-Cl·SO<sub>4</sub>,随后,水化学类型转 变为Na·Mg-Cl·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl· HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl· HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl· HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl· HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>。由此可见,多数时期Na\*通常为流动 地表水中主要阳离子,而Cl<sup>-</sup>、CO<sup>2-</sup>、HCO<sup>-</sup><sub>3</sub>及SO<sup>2-</sup>通常 为主要阴离子。

浅层地下水水化学类型(图6B)主要为Mg·Ca-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na-Cl、Na-SO<sub>4</sub>、Mg·Ca-SO<sub>4</sub>,在地下水







Figure 5 Dynamic change of water quality of flowing surface water and shallow groundwater

水位降低后(2013—2016年),水化学类型依次变为 Na・Mg-HCO<sub>3</sub>・SO<sub>4</sub>、Mg・Ca-HCO<sub>3</sub>・SO<sub>4</sub>、Mg・Ca-HCO<sub>3</sub>・ Cl、Na・Mg-Cl・SO<sub>4</sub>、Na・Mg-HCO<sub>3</sub>・SO<sub>4</sub>、Na・Mg-Cl・ SO<sub>4</sub>、Na·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg·Ca-Cl·SO<sub>4</sub>,随着地下 水位的抬升(2017—2020年),水化学类型变为Na· Mg-Cl·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>·

http://www.aed.org.cn

#### 2023年11月



图6 不同时期内流动地表水及浅层地下水 piper 图分析

Figure 6 Piper analysis of flowing surface water and shallow groundwater in different periods

SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg·Ca-Cl· HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Ca-Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>、Na·Mg-Cl·HCO<sub>3</sub>· SO<sub>4</sub>。这表明在浅层地下水中Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>-</sup>表现出较 强优势。

流动地表水和浅层地下水水化学类型均随时间推移而发生改变。根据地下水埋深划分,2013年4月—2016年10月为地下水位较低时期,其余时期地下水位较高,且2010—2013年地下水位是观测期间内最高的时期。当地下水位明显降低时,水化学类型的点由边缘向中心靠拢,表明各种离子的占比趋于平均。而当地下水位升高时则会偏向于边界,说明某些离子(如Cl<sup>-</sup>和SO<sup>2</sup>)占据了主导地位。

2.3.2 各指标相关性分析

在整个监测周期内,流动地表水与浅层地下水相 同指标(除K\*外)均表现出正相关性,其中Mg<sup>2+</sup>、SO<sup>2+</sup>、 HCO<sub>5</sub>、Na<sup>+</sup>、全磷呈极显著正相关(P<0.01),而Ca<sup>2+</sup>、CO<sup>2+</sup>、 Cl<sup>-</sup>、pH呈显著正相关(P<0.05),表明流动地表水和浅 层地下水以上指标变化趋势高度一致(表2)。K<sup>+</sup>、全 氮和电导率相关性不显著,其中浅层地下水与流动地 表水K<sup>+</sup>相关性系数为负值,说明二者变化不同步。 2.3.3 流动地表水和浅层地下水水质变化规律

选取每年旱季和雨季地下水埋深数据,对各项指标进行均值标准化,结果(图7A)表明,2013年9月— 2016年9月,流动地表水中Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>表现出下降趋势,而在2017年3月后则表现出上升趋势。观测期间内降雨量对Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

#### 表2 流动地表水与浅层地下水各项指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of each index of flowing surface water and shallow groundwater

Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	$CO_{3}^{2-}$	HCO <sub>3</sub>	Cl
0.532*	0.746**	0.843**	0.461*	0.678**	0.474*
$K^{+}$	$Na^+$	全氮	全磷	电导率	pН
-0.005	0.890**	0.016	0.642**	0.001	0.550*

注Note:\* P<0.05;\*\* P<0.01。

影响较为显著。不同离子达到最大值及最小值的时间存在明显差异。在2013年9月之前,各离子达到最大值的时间先后次序为CO<sup>3+</sup>(2011-04),Na<sup>+</sup>(2011-09),SO<sup>4+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>(2012-03),K<sup>+</sup>、HCO<sup>3</sup>、Cl<sup>-</sup>(2013-03)。在2014年9月,地下水埋深变化趋势及地下水埋深均达到最大,不同离子亦表现出相同趋势,各离子达到最小值的时间先后次序为Na<sup>+</sup>(2013-09),CO<sup>2+</sup>、SO<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>(2014-03),HCO<sup>3</sup>(2015-03)。随着地下水位抬升和降雨量的增加,不同离子达到最大值的时间先后顺序为Cl<sup>-</sup>(2016-09),SO<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>(2017-08),CO<sup>2+</sup>(2018-03),Ca<sup>2+</sup>、HCO<sup>3</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>(2019-02)。

浅层地下水中离子含量变化比流动地表水稳定, 同时规律性表现更为明显(图7B)。在2013年9月— 2016年9月期间,浅层地下水中各离子含量表现出下 降趋势,而随着降雨量的增加(2016-09至2018-09) 各离子含量同样表现出上升趋势。在研究中发现,浅



#### 农业资源与环境学报·第40卷·第6期·卷终



层地下水中K<sup>+</sup>峰值的出现规律与观测期间内降雨量 的最大峰值存在一定相似性(2011-09、2014-09和 2017-08)。浅层地下水中各离子达到极值的时间同 样存在差异。在2013年9月之前,各离子达到最大值 的时间先后次序为K<sup>+</sup>(2011-09),SO<sup>2+</sup><sub>4</sub>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> (2012-03),Ca<sup>2+</sup>(2012-09),CO<sup>2+</sup><sub>3</sub>(2013-03),HCO<sup>3</sup><sub>3</sub> (2013-09)。在2014年9月,地下水埋深变化趋势及 地下水埋深均达到最大,不同离子亦表现出相同趋 势,各离子达到最小值的时间先后次序为CO<sup>2+</sup><sub>3</sub>、SO<sup>2+</sup><sub>4</sub>、 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>(2014-03),Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sup>3</sup><sub>3</sub>(2015-09),Cl<sup>-</sup> (2016-03)。随着降雨量的增加和地下水位的抬升, 不同离子达到最大值的时间先后顺序为K<sup>+</sup>(2015-09),SO<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>(2017-03),CO<sup>2+</sup><sub>3</sub>(2018-03),Ca<sup>2+</sup>、HCO<sup>3</sup><sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup>、 Na<sup>+</sup>(2020-09)。

#### 3 讨论

#### 3.1 浅层地下水和流动地表水水质差异性及原因

Zhang等<sup>[14]</sup>指出,区域排水量会影响N、P的流失 速率,全氮、全磷的流失量受降雨量和地下水埋深的 综合影响。研究发现,水体中全氮含量会随地下水埋 深的变化而发生改变,当地下水位较高时,水体中全 氮含量较高,其根本原因是N在土壤中迁移距离较短 且迁移性较强,尤其在更新能力较弱的浅层地下水中 表现更为明显<sup>[15]</sup>。全磷的变化趋势与全氮完全相反, 有研究表明,pH增大时含水层中矿物磷酸根解吸速 率加快,使得更多内源P释放到水体中<sup>[16]</sup>。

土壤中含Na矿物较少,Na<sup>+</sup>主要为生活污水及次 生易溶性盐,且Na<sup>+</sup>易随地表径流及渗入过程进入环 境水体中,因此水体中Na<sup>+</sup>变化规律与降雨量变化情

况一致, 目浅层地下水由于流通性较差更易汇集 Na<sup>+</sup>。 土壤中含K矿物溶解性通常较差,因此钾肥是当地环 境中K<sup>+</sup>的重要来源,有研究表明K<sup>+</sup>主要富集在0~40 cm表层土壤中<sup>[17]</sup>,较难迁移到浅层地下水分布层次, 进而导致浅层地下水中K<sup>+</sup>含量通常低于流动地表 水<sup>[18]</sup>,但本研究中2014—2016年浅层地下水中K\*含 量高于流动地表水的原因仍待探究,其原因可能为 K<sup>+</sup>更易随地表径流汇入流动地表水<sup>[15]</sup>。水体周边的 环境及水体类型会影响 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及 Cl<sup>-</sup>的含 量[19]。本研究发现,随着降雨量增加及地下水位的抬 升,水质状况整体表现为下降趋势。在2012—2020 年期间流动地表水SO4-含量已超过250 mg·L-1而无法 满足生活饮用水的标准(GB 3838—2002《地表水环境 质量标准》),而浅层地下水已超过350 mg·L<sup>-1</sup>致使其 不符合农业用水质量要求(GB/T 14848—2017《地下 水质量标准》)。秸秆降解、生活污水中含S有机物分 解、化肥溶解(如K2SO4)、矿物分解及大气酸沉降是水 体中SO4-的主要来源[20-21]。监测区域内实施秸秆还 田,秸秆等有机物降解产生的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HNO<sub>3</sub>及H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 可进一步溶解土壤和含水层中的矿物,导致水体中 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub>、Ca<sup>2+</sup>及Mg<sup>2+</sup>含量升高。左玉萍等<sup>[22]</sup>发现秸 秆分解率与土壤含水量呈正相关,当降雨量增加时会 提高土壤含水量,有利于秸秆分解产生酸性物质。随 着降雨量增加和地下水位上升,酸性物质更易在渗入 的过程中溶解土壤中方解石及白云石,可产生微溶性 的CaSO4和MgSO4,使得水体中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量升高<sup>[23]</sup>。 当降雨量增加时,地表径流的汇集作用及渗入作用会 提高不同类型水体中SO4-及其他离子含量,而浅层地 下水流动性和更新能力弱于流动地表水,使得水体中

2023年11月

离子浓度更易升高,这也是不同水体类型中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sup>2-</sup>及Cl<sup>-</sup>含量差异在2010—2013年、2018—2020年期间达到最大,而在2014—2017年期间较小的原因。此外,降水会促进土壤矿物质的溶解进而提高地表水和地下水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub>的含量<sup>124</sup>。在2016年9月,流动地表水Cl<sup>-</sup>含量超过250 mg·L<sup>-1</sup>,2017年及2019—2020年浅层地下水中Cl<sup>-</sup>含量超过350 mg·L<sup>-1</sup>,此时地下水质量被划分为V类用水,不符合生活饮用水及农业用水的标准。农药、化肥和生活污水是当地水体中Cl<sup>-</sup>的主要来源,据此得出当地农药及化肥的不合理使用及未经处理生活污水的随意排放是当地农业生产及居民饮水安全的隐患。

### 3.2 浅层地下水和流动地表水水质变化规律及影响 因素

在对水化学类型的研究中发现,多数时期 Na<sup>+</sup>为 流动地表水中的主要阳离子,Cl<sup>-</sup>、SO<sup>2+</sup>通常为主要阴 离子。伴随着降雨量减小,地下水位明显降低,水化 学类型的点由边缘向中心靠拢,表明各种离子的占比 趋于平均。原因是表层秸秆分解产生的有机酸迁移 能力减弱,土壤矿物分解作用及土壤胶体解吸能力降 低,同时易溶于水的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>不易随地表径流扩散、汇 集,因此农田环境变化会不断影响甚至改变水体水化 学类型。Rajendiran等<sup>[25]</sup>同样指出,降雨量会改变印度 沿海地下水水化学类型,在降雨量较高的年份为 Na-HCO<sub>3</sub>和 Na-Cl,而在降雨量较少的年份为 Na-Cl和Ca· Mg-Cl。同一时期的流动地表水和浅层地下水水化学 类型具有高度相似性,其是由水体间关联性造成的还 是由水环境类型所决定的仍待进一步探究。

水质状况通常与周边环境密切相关,且区域内不 同水体类型间同样存在一定的关联性<sup>[26-27]</sup>。本研究 发现,浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、 CO<sub>5</sub><sup>-</sup>整体变化趋势与流动地表水保持一致,说明在同 一个农田生态系统中不同水体水质状况会相互影响。 不同水体中离子成分由矿物溶解作用、离子交换作用 和蒸发作用共同控制,而降雨量会间接影响这些过程 进而改变水体中离子的含量<sup>[28]</sup>。有研究表明,流动地 表水和浅层地下水水质会受到季节性影响<sup>[10,28]</sup>。本 研究发现,监测区域内不同时期的降雨量存在明显的 周期性,而多数离子周期性变化并不明显,说明降雨 对局部区域农田环境水质状况的影响并非即时的。 通过地下水位与离子含量变化的高度相似性可以推 断,降雨可以通过影响地下水埋深进而间接改变水体 中部分离子含量。持续性强降雨(2016年9月—2018

年9月)会促使地下水位回升,并提高水体中离子含 量,但浅层地下水中K+、Ca2+、HCO3峰值出现时期滞后 于强降雨阶段,同时明显晚于其他离子。这种现象可 能与土壤中离子的迁移规律有关,作物秸秆降解形成 的酸性溶液随雨水不断渗入到浅层地下水中,酸性溶 液对含钙土壤矿物的溶解作用及H\*对土壤胶体吸附 K<sup>+</sup>的置换效应致使浅层地下水中K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>浓度升高。 关共凑等[29]在研究中同样发现,在最大降雨量发生后 的第3个月时,土壤Ca2+、Mg2+流失量达到最大,降雨 量对土壤中两种离子含量的影响存在滞后性。由此 可见,降雨量会影响流失离子的类型,进而间接影响 水质状况。此外,孔晓乐等<sup>100</sup>的研究表明,补充水分 对浅层地下水和流动地表水会产生不同的影响,且二 者部分离子峰值出现时期存在差异性。不同离子的 淋失速率亦存在明显差异,丁克冲等四发现,脱盐过 程中盐渍土 Na<sup>+</sup>的淋失速率快于 Ca<sup>2+</sup>,表明花碱土对 Na<sup>+</sup>的吸附能力较弱。离子流失速率存在差异性会导 致其在水体中峰值出现时间存在差异性。本研究发 现,当降雨量增加且地下水位较高时,浅层地下水中 K<sup>+</sup>及流动地表水中Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub>率先达到峰值。部 分离子(流动地表水:Na<sup>+</sup>、SO<sup>2-</sup>;浅层地下水:K<sup>+</sup>)除受 地下水位变化的长期影响外,还对当月降雨量变化较 为敏感。其原因可能为表层秸秆分解产生SO4-,且表 层硫酸盐矿物在酸性环境下的溶解作用使得 SO<sup>2-</sup>易 随地表径流实现迁移,而酸性环境下H\*对土壤胶体 吸附的Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>具有强烈的置换效应,致使其易随地表 径流流失。

通过对豫东平原农田流动地表水和浅层地下水 离子变化规律研究得出,降雨及地下水位会影响甚至 改变农田环境水体离子含量及水化学类型,其本质原 因在于降雨增强了易溶性离子及秸秆降解产生有机 酸的迁移性,尤其在降雨量增加及地下水位明显上 升时,矿物溶解性提高,浅层地下水更新能力弱于流 动地表水,致使其离子含量更高。故可根据降雨情 况、地下水位及水体特质选择适合农业生产的水源进 行利用,同时对降雨及地下水位变化可能引发的水质 问题进行预警。

#### 4 结论

(1)降雨量增多导致地下水位上升,离子在土壤 中迁移距离变短,同时浅层地下水更新能力弱于流动 地表水,导致浅层地下水中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、 Cl<sup>-</sup>含量及电导率通常高于流动地表水。 (2)干、湿两季循环(周期性变化)对水体中不同 离子含量影响较小,离子变化趋势主要由降雨和地下 水位长期变化趋势所调控。

(3)不同时期流动地表水和浅层地下水水化学类型表现出较强相似性,Na<sup>+</sup>为主要阳离子,Cl<sup>-</sup>、SO<sup>2</sup>-为 主要阴离子,随着降雨量减小地下水位会明显降低, 此时水化学类型的点由边缘向中心靠拢,表明降雨量 是造成水体化学类型改变的主要因素。

(4)水体中离子浓度峰值发生时间存在差异,当 降雨量增加且地下水位较高时,浅层地下水中K<sup>+</sup>及 流动地表水中Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sup>2-</sup>率先达到峰值。水体类 型也会对峰值出现时间产生影响,流动地表水中K<sup>+</sup> 和Cl<sup>-</sup>峰值出现时间通常晚于浅层地下水。

(5)在降雨量增加及地下水位上升时,浅层地下 水中SO<sup>2</sup>及CI<sup>-</sup>含量易超过地下水质量标准临界值, 从而不适合作为生活饮用水或农业用水的水源。

#### 参考文献:

- [1] 贾大林,李占柱,刁绍全,等.黄淮海平原商丘李庄实验区旱涝盐碱 综合治理研究[J]. 中国农业科学,1984(1):62-67. JIA D L, LI Z Z, DIAO S Q, et al. A study on the integrated management of drought, water-logging and salinization at an experimental area in the plains of Huang-Huai-Hai river valley[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984(1): 62-67.
- [2] 张建峰, 张旭东, 周金星, 等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本 措施[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6):32-34. ZHANG JF, ZHANG X D, ZHOU J X, et al. World resources of saline soil and main amelioration measures[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (6):32-34.
- [3] 明广辉,田富强,胡宏昌.地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J].农业工程学报,2018,34(5):90-97. MING G H, TIAN F Q, HU H C. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5):90-97.
- [4] 宋嘉,李怀恩,李家科,等. 鹦鹉沟小流域天然降雨条件下水土及养 分流失特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5):7-12, 21. SONG J, LI H E, LI J K, et al. Characteristics of soil and nutrient losses under natural rainfall in Yingwugou small watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5):7-12, 21.
- [5] 顾慰祖, 陆家驹, 赵霞, 等. 无机水化学离子在实验流域降雨径流过 程中的响应及其示踪意义[J]. 水科学进展, 2007, 18(1):1-7. GU W Z, LU J J, ZHAO X, et al. Responses of hydrochemical in organic ions in the rainfall - runoff processes of the experimental catchments and its significance for tracing[J]. Advances in Water Science, 2007, 18 (1):1-7.
- [6] 李平, 张彦, 梁志杰, 等. 暴雨对引黄灌区土壤与地下水环境影响研

究[J]. 人民黄河, 2020, 42(1):63-67, 71. LIP, ZHANG Y, LIANG Z J, et al. Influence of rainstorm on environmental characteristics of soil and groundwater in typical area of Yellow River irrigation area[J]. *Yellow River*, 2020, 42(1):63-67, 71.

- [7] PLEYSIER J L, JUO A S R. Leaching of fertilizer ions in a ultisol from the high rainfall tropics: leaching through undisturbed soil columns[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(4):754–760.
- [8] 王丹影, 马延东, 贾志峰, 等. 玛纳斯河流域沙漠与绿洲过渡带土壤水盐变化特征与规律[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20):44-50.
  WANG D Y, MA Y D, JIA Z F, et al. Characteristics and law of soil water and salt changes in the desert and oasis transition zone of the Manas River basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(20): 44-50.
- [9] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20):128-136. HAOYY, XU X, HUANG Q Z, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (20):128-136.
- [10] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43(1):220-229. LISJ, HANX, WANGWH, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River basin[J]. Environmental Science, 2022, 43(1):220-229.
- [11] 李平, MAGZUM N, 梁志杰, 等. 渠井用水比例对土壤脱盐与地下水化学特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(3):526-536. LI P, MAGZUM N, LIANG Z J, et al. Effects of canal well water ratios on root layer soil desalination and groundwater hydrochemical character-istics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(3):526-536.
- [12] 张岩, 董维红, 李满洲, 等. 河南平原浅层地下水水化学分布特征 及其污染成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5):148-153. ZHANG Y, DONG W H, LI M Z, et al. The hydrochemical distribution law and the causes of pollution of shallow groundwater in Henan plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25 (5):148-153.
- [13] TALSMA T, MANSELL R S, HALLAM P M. Potassium and chloride movement in a forest soil under simulated rainfall[J]. Soil Research, 1980, 18:333-342.
- [14] ZHANG X X, YI Y J, YANG Z F. Nitrogen and phosphorus retention budgets of a semiarid plain basin under different human activity intensity[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703:1–10.
- [15] 高杨, 宋付朋, 马富亮, 等. 模拟降雨条件下 3 种类型土壤氮磷钾 养分流失量的比较[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):15-18. GAO Y, SONG F P, MA F L, et al. Comparison of loss amount of nitrogen, phosphrus and potassium in three types of soil under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2):15-18.
- [16] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的 影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1):15-19. WANG X R, HUA Z Z, XU L, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15 (1):15-19.

-1306 -

- [17] 王计平. 干旱条件下氮、磷、钾元素随滴灌水运移规律及影响因素 研究[D]. 太原:山西农业大学, 2001. WANG J P. Studies on N, P, K moving rules with drip irrigating water and the influencing factor [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2001.
- [18] 赵君怡,张克强,王风,等.猪场废水灌溉对地下水中钾、钙、钠、镁含量的影响[J].水土保持学报,2011,25(5):135-139. ZHAO JY, ZHANG KQ, WANG F, et al. Influence of livestock wastewater irrigation on potassium, calcium, sodium and magnesium contents in groundwater[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 135-139.
- [19] 王时茂, 曲婷, 胡皓翔, 等. 陕西秦岭北麓猕猴桃主产区水质动态变 化研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12):2853-2859. WANG S M, QU T, HU H X, et al. Dynamic water quality changes in a kiwifruit production area of the northern Qinling[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(12):2853-2859.
- [20] 王潇, 刘德玉, 汤超, 等. 天水市区浅层地下水硫酸根离子含量时空变化趋势及超标成因分析[J]. 地下水, 2022, 44(5):69-71. WANGX, LIU DY, TANGC, et al. Temporal and spatial variation trend of sulfate ion content in shallow groundwater in Tianshui City and cause analysis of exceeding standard[J]. Ground Water, 2022, 44(5):69-71.
- [21] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降:来源、影响与控制[J]. 环境科学 学报, 2021, 41(3):731-746. YU Q, DUAN L, HAO J M. Acid deposition in China: sources, effects and control[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(3):731-746.
- [22] 左玉萍, 贾志宽. 秸秆分解土壤水分适宜区间及临界值[J]. 西北农 业学报, 2003(3): 73-75. ZUO Y P, JIA Z K. Suitable soil water content and critical value for straw decomposing[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2003(3): 73-75.
- [23] 蔡绪贻,陈静生,桂平,等.华北地区城市地下水中主要离子含量 升高机理分析:以洛阳市为例[J].环境化学,1995(5):393-401. CAIXY, CHENJS, GUIP, et al. The mechanism controlling the variations of major ions concentration in groundwater in north China area: a case study of Luoyang City[J]. Environmental Chemistry, 1995 (5):393-401.
- [24] 崔旭,张兵,何明霞,等. 生态补水对白洋淀流域地表水和地下水水化学特征的影响[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1675-1686. CUI X, ZHANG B, HE M X, et al. Impacts of ecological water replenishment on the hydrochemical characteristics of surface water and groundwater in Lake Baiyangdian watershed[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1675-1686.

- [25] RAJENDIRAN T, SABARATHINAM C, CHANDRASEKAR T, et al. Influence of variations in rainfall pattern on the hydrogeochemistry of coastal groundwater: an outcome of periodic observation[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2019, 26(3):29173-29190.
- [26] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系[J]. 环境科学, 2022, 43(4):1873-1884. LEI M, ZHOU J L, ZHANG J, et al. Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River basin, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2022, 43(4):1873-1884.
- [27] 雷义珍,曹生奎,曹广超,等.青海湖沙柳河流域不同时期地表水 与地下水的相互作用[J].自然资源学报,2020,35(10):2528-2538. LEI Y Z, CAO S K, CAO G C, et al. Study on surface water and groundwater interaction of Shaliu River basin in Qinghai Lake in different periods[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10):2528-2538.
- [28] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5428-5439. LIU J T, CAIW T, CAOYT, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, 39(12):5428-5439.
- [29] 关共凑, 魏兴琥. 自然降雨对粤北岩溶区土壤钙、镁离子流失影响 模拟试验[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):73-76, 83. GUAN G C, WEI X H. Simulation experiment on effect of soils calcium and magnesium ions losses on natural rainfall in karst rocky area of north Guangdong[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 73-76, 83.
- [30] 孔晓乐, 王仕琴, 刘丙霞, 等. 外来调水对华北低平原区地表水和 地下水水化学特征的影响:以河北省南皮县为例[J]. 中国生态农 业学报, 2016, 24(8):1135-1144. KONG X L, WANG S Q, LIU B X, et al. Effect of water diversion on hydro-chemical characteristics of surface water and groundwater in lowland area of the North China Plain: a case study of Nanpi County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8):1135-1144.
- [31] 丁克冲,陈邦本,陈铭达. 江苏滨海盐土与花碱土脱盐过程中盐碱 性状变化的异同[J]. 南京农业大学学报, 1992, 15(4):61-67.
  DING K C, CHEN B B, CHEN M D. The comparison of saline-alkali properties in seashore saline and alkaline soil in the desalinization in Jiangsu[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1992, 15(4): 61-67.