

渠井用水比例对土壤脱盐与地下水化学特征的影响

李平^{1,2}, Magzum Nurolla¹, 梁志杰², 黄仲冬³, 齐学斌^{1,3}

(¹中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453002; ²中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南新乡 453002;

³中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南新乡 453002)

摘要:【目的】通过研究华北典型井渠结合灌区不同用水模式对区域土壤盐分分布、根层土壤脱盐、地下水化学特征的影响, 探讨华北井渠结合灌区适宜的渠井用水比例。【方法】2013—2015 年在人民胜利渠灌区选择西三千渠控制范围为典型区域, 监测控制范围内降水量、地表水灌溉量、地下水灌溉量、0—100 cm 土层土壤含盐量、地下水矿化度, 分析不同用水模式对根层土壤盐分洗脱、地下水化学特征的影响。【结果】2013—2015 年一支渠、二支渠、三支渠渠井用水比例分别介于 0.72—1.03、2.50—2.63、0.65—1.26 之间; 2013—2015 年冬小麦苗期, 不同用水模式下 0—100 cm 土层土壤盐分垂向分布均表现为上高、中低、下高, 尤其是 0—20 cm 土层土壤盐分表聚明显; 2013—2015 年冬小麦苗期一支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹ 面积分别占到控制范围的 60.38%、25.99%、41.16%, 二支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹ 面积分别占到控制范围的 59.61%、0.94%、8.81%, 三支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹ 面积分别占到控制范围的 84.40%、41.87%、52.49%, 表明渠井用水比例与支渠控制范围内表层土壤含盐量大于 0.32 mS·cm⁻¹ 的面积呈负相关; 对比 2013 年同期, 2014 年典型区内 0—20 cm 土壤脱盐率介于 15.61%—25.85%, 2015 年典型区内 0—20 cm 土壤脱盐率介于 13.33%—23.15%; 不同渠井用水比例典型区域地下水水化学特征均表现为: 地下水中阳离子由枯水期钙型转化为平水期的钠钙型, 平水期地下水水化学相具有强烈的碱化趋势, 特别是平水期二支渠地下水溶解性总固体增幅分别为一支渠、三支渠的 1.23、3.48 倍, 表明较大渠井用水比例地表水灌溉驱动了根层土壤脱盐, 增加了地下水中可溶性盐分浓度; 对比 2014 年平水期, 2015 年同期一支渠、二支渠和三支渠控制范围地下水钠吸附比分别降低了 23.58%、36.82%和 55.47%, 且区域地下水钠吸附比均低于 18 分级值。【结论】综合 2013—2015 年 0—100 cm 土层土壤脱盐率、地下水化学特征变化, 在华北典型井渠结合灌区采用较大的渠井用水比例可以促进耕层土壤的脱盐、抑制土壤盐分表聚, 同时短期内改善地下水环境。

关键词: 渠井用水比例; 土壤含盐量; 脱盐率; 水化学特征; 钠吸附比; 井渠结合灌区

Effects of Canal Well Water Ratios on Root Layer Soil Desalination and Groundwater Hydrochemical Characteristics

LI Ping^{1,2}, Magzum NUROLLA¹, LIANG ZhiJie², HUANG ZhongDong³, QI XueBin^{1,3}

(¹Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, Henan; ²Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, Henan;

³Key Laboratory of High-Efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, Henan)

Abstract: 【Objective】The effects of water utilization patterns on root soil desalination and groundwater hydrochemical characteristics were studied in well-canal combined irrigation areas in North China. 【Method】A representative area was selected in

收稿日期: 2016-07-19; 接受日期: 2016-11-21

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203077)、中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-FIRI-03)

联系方式: 李平, E-mail: firilp@163.com. 通信作者齐学斌, E-mail: qxb6301@sina.cn

the Renmin Shengli Canal District from 2013 to 2015. Precipitation of the area, surface irrigation amount, groundwater irrigation amount, canal well water ratio (ratio of surface to groundwater irrigation amount, CWWR), salinity in 0-100 cm soil layer and groundwater total dissolved solids were analyzed for different irrigation patterns. 【Result】CWWR of 1st, 2nd, 3rd branch canals was between 0.72 and 1.03, 2.50 and 2.63, 0.65 and 1.26 in 2013 to 2015, respectively. Soil saline contents of 0-100 cm layer under water utilization patterns were high in topsoil and lower layers, but low in middle layers. Salt accumulation occurred especially in the 0-20 cm soil layer. The ratio of the area with soil salinity greater than $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ to 1st branch canal irrigation areas was 60.38%, 25.99% and 41.16% in 2013 to 2015, for 2nd branch canal, was 59.61%, 0.94% and 8.81%, for 3rd branch canal, was 84.40%, 41.87% and 52.49%, respectively. The area with topsoil salinity greater than $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ of branch canals irrigated area was negatively correlated with CWWR, that is to say, the larger CWWR, the less areas with topsoil salinity greater than $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ of irrigation areas. Salt accumulation in topsoil was suppressed under the water utilization pattern of larger CWWR. Compared with 2013, desalination rate in 0-20 cm layer was between 15.61% and 25.85% in 2014, and between 13.33% and 23.15% in 2015. According to the desalination rate in 0-100 cm layer from 2013 to 2015, it was found that the desalination rate of root layers was improved under larger CWWR. Hydrochemical characteristics of groundwater was obvious alkaline because cation changed from $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ type in dry period to $\text{Na}^{+}/\text{Ca}^{2+}$ type in normal period. Specifically increase of total soluble solid of 2nd branch canal irrigation area was higher than that of 1st and 3rd branch canal irrigation areas by 1.23-fold and 3.48-fold in normal period, respectively. Compared to sodium adsorption ratio (SAR) in dry period in 2014, SAR of 1st, 2nd, and 3rd branch canal irrigation areas in 2015 decreased by 23.58%, 36.82%, and 55.47%, respectively. Furthermore, SAR of groundwater was lower than 18 in 2015. 【Conclusion】Larger ratio of surface water to groundwater irrigation amount would promote desalination of soil root layer, suppress salt accumulation in topsoil, and furthermore alleviate alkaline trend of groundwater in short term.

Key words: canal well water ratio; soil salinity; desalinization rate; hydrochemical characteristics; sodium adsorption ratio; well-canal combined irrigation district

0 引言

【研究意义】土壤含盐量过高会抑制或遏制作物生长,尤其在干旱或半干旱灌溉农业区域,较高的蒸腾拉力驱使土壤可溶性盐分在根层土壤大量累积^[1],导致根层土壤盐分浓度高于正常浓度,对作物产量造成严重威胁^[2]。根据《全国农业可持续发展规划(2015—2030)》中的区域布局,黄淮海平原是中国重要农业优化发展区之一,但其资源环境承载力与规划要求并不相适应。从上世纪五十年代开始,中国众多专家学者开展了卓有成效的工作,支撑了黄淮海平原旱涝盐碱综合治理、农业增效、农民增收^[3]。早期有关黄淮海平原水分均衡估算结果表明,水分支出的 25.7% 为入海量,绝大部分是以蒸散的形式排出区外,假定雨水和引黄水含盐量分别为 0.04‰、0.4‰,每年有近 0.4 亿吨盐累积在黄淮海平原中^[4-5],华北地区是中国高度集约化农区和重要粮食主产区,近年来该地区农业用水比重逐年下降,尤其是农业用水被挤占严重,供需缺口已经超过 100 亿 m^3 ^[6]。以人民胜利渠灌区为例,降水量 3 年滑动平均值回归分析表明区域降水量以 $2.92 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 速度减少,近 5 年灌区农业用水量仅占多年灌区农业用水量的 75% 左右^[7],特别是春冬季节降水频率有增加而夏秋季节降水频率在下

降^[8],加剧了土壤次生盐渍化的形成^[9],因此华北典型井渠结合灌区维持区域水盐均衡对于农业可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】前人有关井渠结合灌区用水模式研究主要集中在灌区水资源高效利用模式^[10-12]、渠井用水比例对地下水位影响的模拟^[13]、灌区地下水环境对作物生长的影响^[14]、井渠联合利用的灌溉环境效应^[15]、灌区节水改造对农田水环境影响评价^[16]、井渠结合灌区用水强度与地下水承载力评价^[17]、灌溉对地下水化学特征影响^[18]等方面,以上有关研究结果表明,不同井渠结合灌区用水模式对于区域农业水资源时空配置和粮食安全具有重要意义,值得注意的是,不适宜的井渠结合灌区用水模式可能导致耕层土壤积盐、区域地下水环境恶化等问题。【本研究切入点】有关井渠结合灌区水资源配置的研究仍局限于农业水资源利用效率、粮食产量和地下水承载力等方面,而对区域土壤、地下水环境影响如何,尤其是气候变化和流域闭合等背景下^[19],渠井用水比例对区域土壤-地下水系统环境效应的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究通过对人民胜利渠灌区典型区域土壤盐分洗脱特征、地下水环境变化特征的分析,研究不同渠井用水比例对灌区土壤-地下水系统生态环境的影响,探讨根层盐分洗脱特征以及地下水化学特征变化与渠井用水比例的关系,

从而为华北平原井渠结合灌区适宜用水模式的构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为人民胜利渠西三干渠控制范围内(35°8'19"—35°11'32"N、113°43'1"—113°44'12"E,海拔77—81 m),属暖温带大陆性季风型气候区,年平均气温14.5℃,最高41℃,最低-16℃;无霜期210 d左右,早霜多出现在10月下旬,晚霜出现在3月中下旬;多年平均水面蒸发量1 860 mm左右,降雨量不足600 mm,雨量少且在年内分布不均,6—9月份的降雨量占全年降雨量的70%—80%。该区域为典型井渠结合灌区、渠井设施配套良好,区域内作物种植模式、用水方式、用水水平基本一致,作物种植模式为冬小麦-夏玉米轮作。

1.2 试验布置

西三干渠灌溉农田面积总计800 hm²,西三干渠控制范围内包括三条支渠,其中一支渠、二支渠、三支渠农田灌溉面积分别为300.0、213.3、286.7 hm²。西三干渠渠系工程、地下水监测点及土壤监测点布置详见图1。2013—2015年,用水方式详见表1。引黄水全盐量为390—452 mg·L⁻¹,地下水全盐量为762—1 464 mg·L⁻¹。

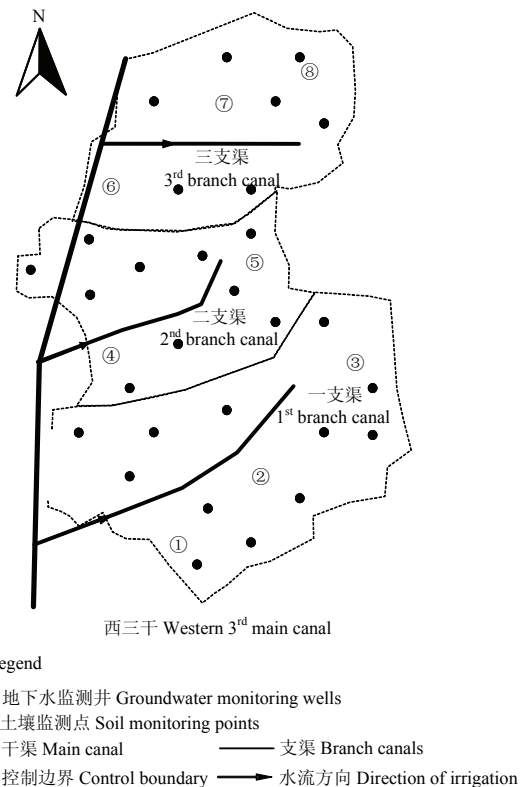


图1 西三干渠灌溉渠系工程及土壤、地下水监测点布置图
Fig. 1 The layout of western 3rd main canal in the Renmin Shengli Canal irrigation district

表1 2013—2015年不同支渠控制范围引黄水、地下水灌溉量

Table 1 Irrigation amounts from surface water and groundwater for branch canal areas in 2013-2015

年份 Year	一支渠 1 st branch canal			二支渠 2 nd branch canal			三支渠 3 rd branch canal		
	引黄水 SWIM (×10 ⁴ m ³)	地下水 GWIM (×10 ⁴ m ³)	用水比例 CWWR	引黄水 SWIM (×10 ⁴ m ³)	地下水 GWIM (×10 ⁴ m ³)	用水比例 CWWR	引黄水 SWIM (×10 ⁴ m ³)	地下水 GWIM (×10 ⁴ m ³)	用水比例 CWWR
2013	207.87	201.67	1.03	208.44	79.11	2.63	213.69	169.01	1.26
2014	140.11	161.33	0.87	158.06	63.29	2.50	129.83	135.21	0.96
2015	128.08	177.00	0.72	181.13	70.40	2.57	121.33	186.33	0.65

$CWWR = \frac{SWIM}{GWIM}$, CWWR: 用水比例 Canal well water ratio; SWIM: 引黄水灌溉量 Surface water irrigation amount; GWIM: 地下水灌溉量 Groundwater irrigation amount

1.3 土壤采集和分析

2013—2015年均选择在冬小麦苗期(10月15日左右)取样,土壤监测点布置详见图1。每个监测点取样深度分别为0—10、10—20、20—30、30—40、40—60、60—80、80—100 cm,采用5点取样法进行取样,样品采集后混合均匀,风干后保存。土壤中全

盐量采用电导法测定^[20],测定其土水质量比1:5浸提液电导率值(DDS-307型,上海雷磁)。

1.4 地下水取样和分析

典型区地下水矿化度监测于每月20日进行,地下水监测点布置详见图1。采用定深取样器(Solinst 425, Solinst, Canada)现场采集地下水样品,每个监测点

每次采集样品 1 000 mL, 样品采集后及时送检。pH 采用便携式 pH 计法测定 (PHSJ-5, 雷磁, 上海), 水溶性盐总量采用电导法测定 (DDS-307, 雷磁, 上海), K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度采用原子吸收法测定 (AA-7000, SHIMADZU, Japan), CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度采用离子色谱法测定 (ICS-1500, Dionex, USA)。

1.5 参数计算

$$DR = \frac{N^{th}SS - (N+1)^{th}SS}{N^{th}SS} \times 100\% \quad (1)$$

式中, DR (desalination rate, %) 为土壤脱盐率^[21]; $N^{th}SS$ 为第 N 年冬小麦苗期土壤含盐量; $(N+1)^{th}SS$ 为第 $(N+1)$ 年冬小麦苗期土壤含盐量。

2 结果

2.1 降水及灌溉特征

2013—2015 年典型区域降水及灌溉特征详见图 2。区域多年平均降水量为 574.0 mm, 2013—2015 年全年降水量分别为 466.9、558.5、569.6 mm, 其中主汛期降水量 (7—9 月) 分别占全年降水量的 67.08%、73.36%、51.47%; 降水量按季节划分^[22], 2015 年典型区春季降水量 135.0 mm, 较多年均值增加了 20.11%; 夏季降水量 306.2 mm, 较多年均值减少了 10.57%; 秋季降水量 111.0 mm, 较多年均值增加了 10.89%; 冬季降水量 17.4 mm, 较多年均值减少了 8.90%。灌溉特征表现为: 2013 年灌水 2 次, 灌溉时间为冬小麦返青期和冬小麦苗期, 灌水量分别为 22.2、58.2 mm;

2014 年灌水 2 次, 灌溉时间为冬小麦返青期和夏玉米苗期, 灌水量分别为 47.6、59.8 mm; 2015 年灌水 3 次, 灌溉时间为冬小麦返青期、夏玉米苗期和冬小麦苗期, 灌水量分别为 28.3、68.2、20.3 mm。

2.2 不同渠井用水比例下根层土壤盐分垂向分布特征

人民胜利渠灌区典型区域不同支渠控制范围冬小麦苗期根层土壤盐分垂向分布详见图 3。2013—2015 年冬小麦苗期, 20—40 cm 土层土壤含盐量最低, 0—10 cm 表层土壤均出现不同程度集盐, 盐分运动处于上升状态, 属于表聚型盐分割面, 表层土壤含盐量介于 0.2839—0.4129 $mS \cdot cm^{-1}$ 。2014 年一支渠苗期不同土层土壤盐分均低于 2013 年同期, 降幅介于 9.04%—26.18%; 2014 年二支渠苗期 0—10、10—20、20—30、30—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层土壤盐分均低于 2013 年同期, 降幅介于 9.78%—33.28%; 2014 年三支渠苗期 0—10、10—20、20—30、30—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层土壤盐分均低于 2013 年同期, 降幅介于 4.56%—36.35%。2015 年一支渠苗期 0—10、10—20、30—40、80—100 cm 土层土壤盐分低于 2013 年同期, 降幅介于 1.05%—31.26%; 2015 年二支渠苗期 0—10、10—20、80—100 cm 土层土壤盐分低于 2013 年同期, 降幅介于 8.34%—27.18%; 2015 年三支渠苗期 0—10、10—20、80—100 cm 土层土壤盐分低于 2013 年同期, 降幅介于 9.72%—18.06%。从土壤盐分垂向分布特征来看, 2013—2015 年冬小麦苗期根层土壤盐分垂向分布规律基本一致, 即根层土壤盐

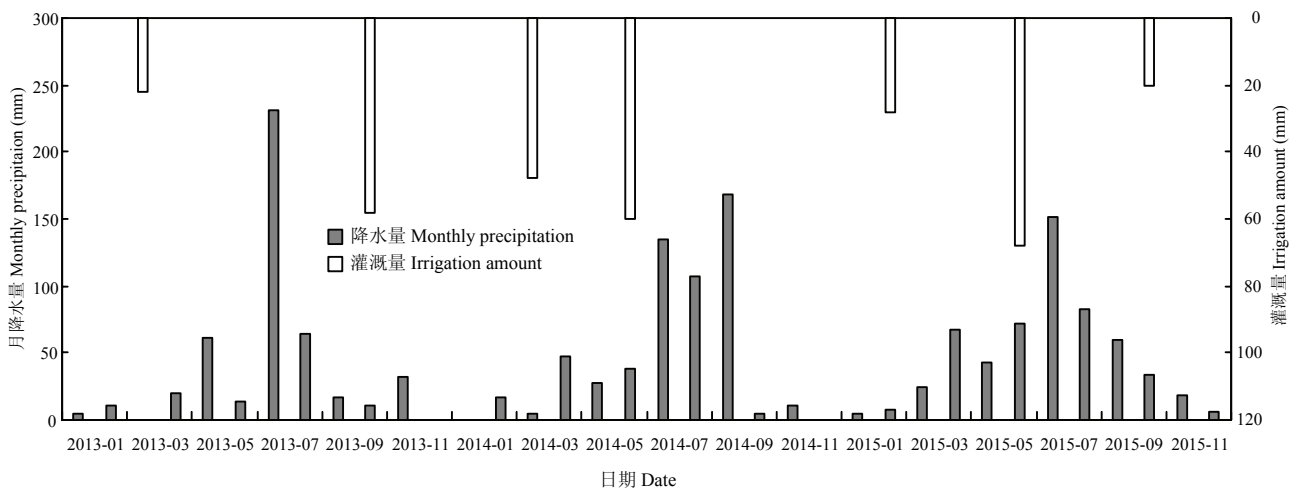


图 2 2013—2015 年月降水量与灌溉量分布特征

Fig. 2 Distribution of monthly precipitation and irrigation amounts from 2013 to 2015

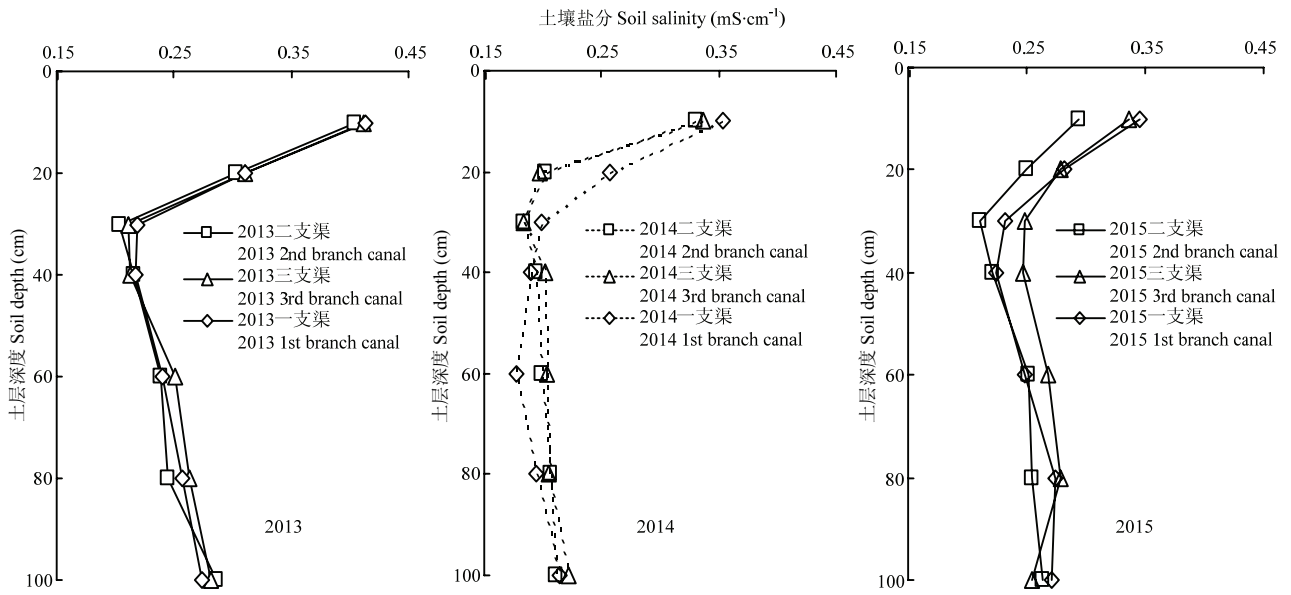


图3 2013—2015年不同支渠控制范围根层土壤盐分垂向分布

Fig. 3 Soil salinity dynamics with soil depth in branch canals irrigation area from 2013 to 2015

分随土层深度增加呈先降低后升高趋势，20—30 cm 土层土壤含盐量最低。

2.3 不同渠井用水比例根层土壤盐分空间变化特征

典型区域 2013—2015 年冬小麦苗期 0—20 cm 耕层土壤盐分空间分布详见图 4。2013—2015 年 0—20

cm 根层土壤盐分均值分别为 0.3456、0.2820、0.2991 mS·cm⁻¹，0—20 cm 根层土壤盐分均值标准偏差分别为 0.071、0.058、0.029。2013 年冬小麦苗期一支渠、二支渠、三支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹（折合土壤含盐量 1.50 g·kg⁻¹ [23]）

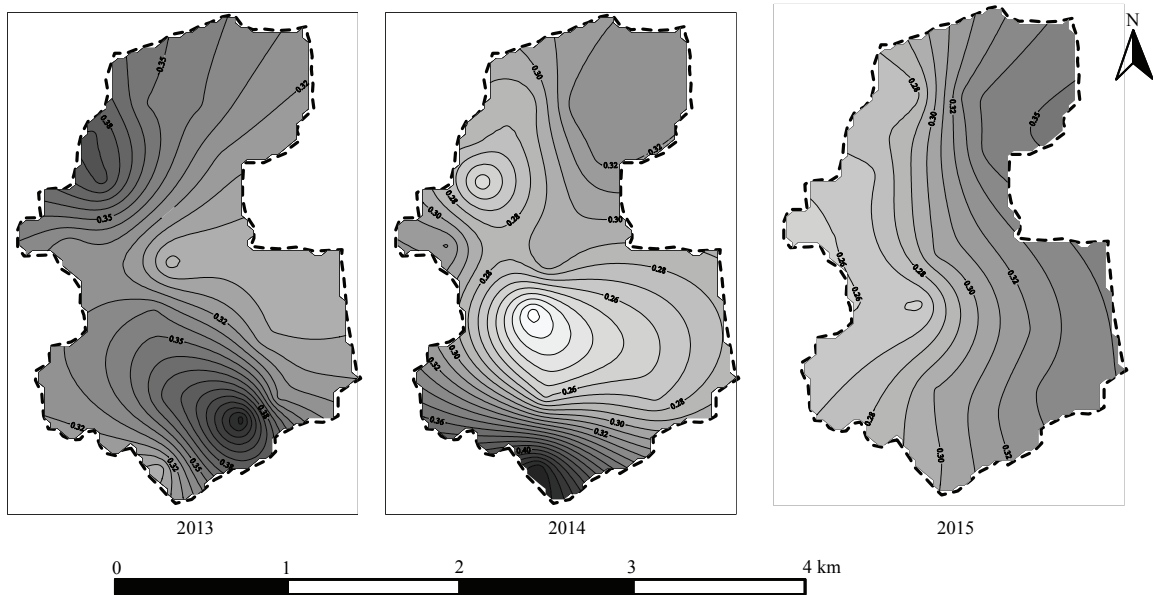


图4 典型区域 0—20 cm 耕层土壤盐分均值空间分布

Fig. 4 Distribution of average soil salinity of 0 to 20 cm soil layer in research areas from 2013 to 2015

面积分别占到控制范围的 60.38%、59.61%、84.40%；2014 年同期一支渠、二支渠、三支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹ 面积分别占到控制范围的 25.99%、0.94%、41.87%，分别较 2013 年减少了 56.95%、98.42%、50.39%；2015 年同期一支渠、二支渠、三支渠控制范围内 0—20 cm 根层土壤

盐分均值大于 0.32 mS·cm⁻¹ 面积分别占到控制范围的 41.16%、8.81%、52.49%，分别较 2013 年减少了 31.83%、85.22%、37.81%。

2.4 不同渠井用水比例对根层土壤洗脱影响

不同用水模式下不同土层年际洗脱效果差异较大（表 2）。2014 年冬小麦苗期一支渠、二支渠、三支

表 2 不同土层盐分含量变化与脱盐率

Table 2 Salinity and salinity desalination rate in different soil layers

土层 Soil layer (cm)	控制范围 Control area of branch canal	2013—2014			2014—2015			2013—2015 年脱盐率 Desalination rate in 2013-2015 (%)
		初始盐分 Initial soil salinity (mS·cm ⁻¹)	结束盐分 Final soil salinity (mS·cm ⁻¹)	脱盐率 Desalination rate (%)	初始盐分 Initial soil salinity (mS·cm ⁻¹)	结束盐分 Final soil salinity (mS·cm ⁻¹)	脱盐率 Desalination rate (%)	
0-10	一支渠 1 st branch canal	0.4129	0.3535	14.40	0.3535	0.3459	2.15	16.24
	二支渠 2 nd branch canal	0.4034	0.3308	17.99	0.3308	0.2938	11.20	27.18
	三支渠 3 rd branch canal	0.4111	0.3375	17.90	0.3375	0.3368	0.20	18.06
	一支渠 1 st branch canal	0.3114	0.2578	17.21	0.2578	0.2819	-9.34	9.48
10-20	二支渠 2 nd branch canal	0.3034	0.2024	33.28	0.2024	0.2494	-23.21	17.80
	三支渠 3 rd branch canal	0.3111	0.1980	36.35	0.1980	0.2794	-41.13	10.18
	一支渠 1 st branch canal	0.2194	0.1996	9.04	0.1996	0.2316	-16.04	-5.55
	二支渠 2 nd branch canal	0.2034	0.1835	9.78	0.1835	0.2107	-14.81	-3.59
20-30	三支渠 3 rd branch canal	0.2111	0.1843	12.66	0.1843	0.2485	-34.82	-17.75
	一支渠 1 st branch canal	0.2178	0.1895	12.98	0.1895	0.2245	-18.46	-3.09
	二支渠 2 nd branch canal	0.2162	0.1938	10.33	0.1938	0.2206	-13.80	-2.05
	三支渠 3 rd branch canal	0.2122	0.2025	4.56	0.2025	0.2472	-22.09	-16.53
30-40	一支渠 1 st branch canal	0.2399	0.1771	26.18	0.1771	0.2484	-40.30	-3.58
	二支渠 2 nd branch canal	0.2392	0.1989	16.83	0.1989	0.2513	-26.33	-5.07
	三支渠 3 rd branch canal	0.2512	0.2043	18.68	0.2043	0.2682	-31.27	-6.74
	一支渠 1 st branch canal	0.2569	0.1950	24.09	0.1950	0.2746	-40.83	-6.90
40-60	二支渠 2 nd branch canal	0.2452	0.2070	15.57	0.2070	0.2542	-22.80	-3.67
	三支渠 3 rd branch canal	0.2633	0.2055	21.95	0.2055	0.2784	-35.49	-5.76
	一支渠 1 st branch canal	0.2737	0.2144	21.67	0.2144	0.2709	-26.32	1.05
	二支渠 2 nd branch canal	0.2868	0.2117	26.20	0.2117	0.2629	-24.19	8.34
60-80	三支渠 3 rd branch canal	0.2819	0.2213	21.49	0.2213	0.2545	-14.99	9.72
	一支渠 1 st branch canal							
	二支渠 2 nd branch canal							
	三支渠 3 rd branch canal							

渠控制范围 0—10、10—20、20—30、30—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层土壤含盐量较 2013 年同期均有所降低, 脱盐率介于 9.04%—36.35%, 2015 年冬小麦苗期一支渠、二支渠、三支渠控制范围 10—20、20—30、30—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层土壤含盐量较 2014 年同期均有所增加, 积盐率达到 1.53%—41.13%, 但 2015 年冬小麦苗期一支渠、二支渠、三支渠控制范围 0—10 cm 土层土壤含盐量较 2014 年同期均有所降低; 从 2013—2015 年不同用水模式土壤盐分洗脱效果来看, 2015 年冬小麦苗期一支渠、二支渠、三支渠控制范围 0—10、10—20、80—100 cm 土层土壤含盐量较 2013 年同期均有所降低, 特别是二支渠控制范围内 0—20 cm 土壤脱盐效果最为明显, 达到 23.15%, 分别较一支渠、三支渠控制范围土壤脱盐率增加 73.65%、57.86%, 而 2015 年 20—30、30—40、40—60、60—80 cm 土层土壤含盐量较 2013 年同期均有所增加, 其中二支渠控制范围内 20—80 cm 土壤积盐率分别较一支渠、三支渠降低 19.30%、60.99%。

2.5 不同用水模式对区域地下水环境影响

典型区域不同时期地下水化学变化特征详见图

5。由 Piper 三线图及水文化学相的分类, 2013—2015 年不同用水模式下典型区域地下水水化学特征变化趋势基本一致, 即枯水期 (12—2 月), 地下水阳离子化学类型为钙、钠型, 平水期 (3—5 月、10—11 月), 地下水阳离子化学类型为钠、钙型, 丰水期 (6—9 月), 地下水阳离子化学类型为钙、钠型; 典型区域地下水化学变化特征变化表明, 地下水中阳离子由枯水期钙钠型转化为平水期的钠钙型, 平水期地下水水文化学相具有强烈的碱化趋势, 这主要因为平水期潜水蒸发和地下水开采共同作用导致潜水被浓缩^[24-25]。对比相同支渠控制范围同时期不同年份地下水水文化学相 (表 3), 2015 年枯水期一支渠、二支渠、三支渠控制范围地下水溶解性总固体分别较 2014 年同期增加了 30.28%、21.83%、33.95%; 2015 年平水期一支渠、二支渠、三支渠控制范围地下水溶解性总固体分别较 2014 年同期增加了 13.35%、27.88%、5.17%; 2015 年丰水期一支渠、二支渠、三支渠控制范围地下水溶解性总固体分别较 2014 年同期增加了 0.81%、18.29%、16.43%, 表明 2015 年区域地下水溶解性总固体较 2014 年增幅明显, 特别是平水期二支渠地下水溶解性总固体增幅分别为一支渠、三支渠

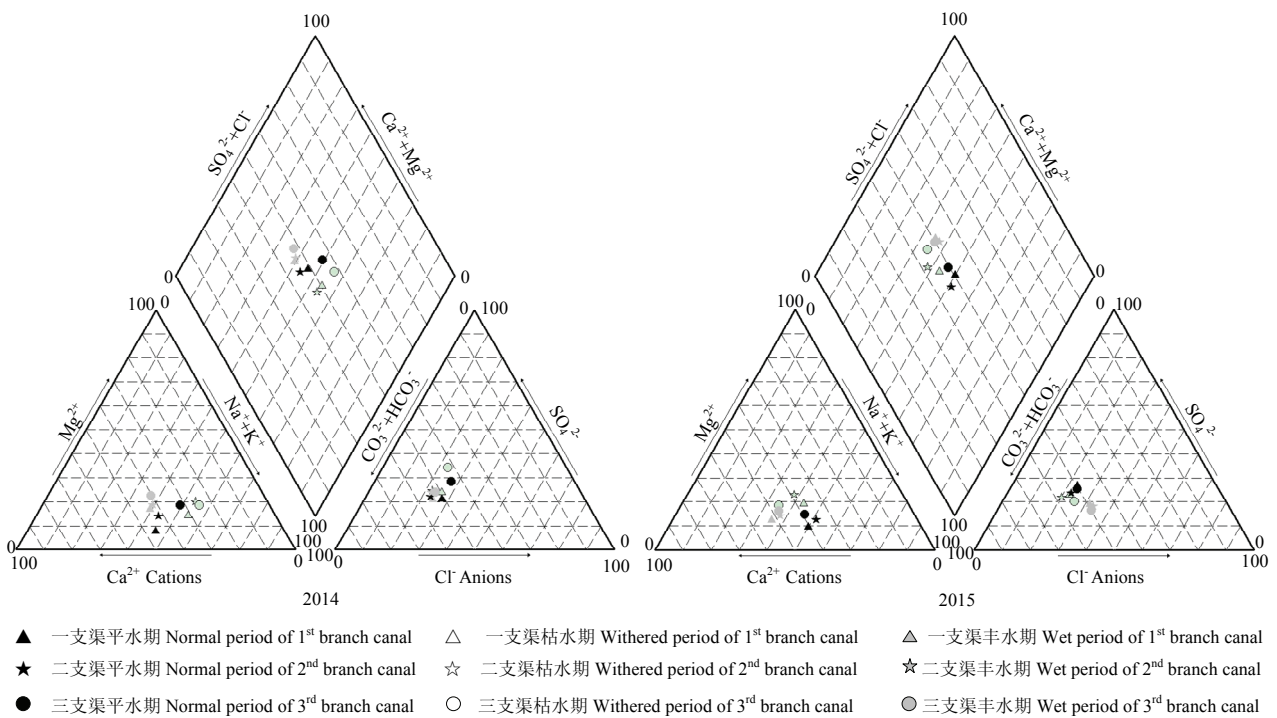


图 5 2013—2015 年不同渠井用水比例典型区域地下水水化学特征年内变化

Fig. 5 Dynamics of groundwater hydrochemistry of typical area under CWW ratios from 2013 to 2015

表 3 不同支渠控制范围内地下水水化学特征动态

Table 3 Annual dynamics of groundwater hydrochemical characteristics of a typical branch canal irrigation area

年份	灌溉范围	时期	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	总可溶性固体	钠吸附比	
Year	Irrigation area	Water period	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	TDS (mg·L ⁻¹)	SAR	
2014	一支渠 1 st branch canal	枯水期	112.88	11.67	129.25	0.00	0.00	403.72	126.37	131.80	895.63	16.38	
		平水期	83.56	23.38	167.18	0.00	0.00	412.91	126.38	156.55	947.41	22.86	
		Normal period											
	二支渠 2 nd branch canal	丰水期	187.18	43.96	194.63	0.00	0.00	485.28	126.38	145.93	868.49	18.10	
		Wet period											
		枯水期	140.40	28.70	167.70	0.00	0.00	555.78	136.18	178.53	1113.43	18.24	
	三支渠 3 rd branch canal	Dry period											
		平水期	82.93	39.98	201.12	0.00	0.00	511.53	126.33	186.85	1009.83	25.66	
		Normal period											
	三支渠 3 rd branch canal	丰水期	212.19	58.14	230.06	0.00	0.00	576.53	142.73	205.05	838.24	19.79	
		Wet period											
		枯水期	91.20	32.30	162.00	0.00	0.00	373.30	135.10	188.10	981.20	20.62	
2015	一支渠 1 st branch canal	Dry period											
		平水期	111.35	34.58	185.41	0.00	0.00	496.35	119.46	162.86	1073.85	17.47	
		Normal period											
	二支渠 2 nd branch canal	丰水期	234.12	33.74	182.68	0.00	0.00	371.11	140.07	112.28	875.51	15.79	
		Wet period											
		枯水期	135.42	28.47	157.24	0.00	0.00	609.87	151.12	211.70	1356.47	24.29	
	三支渠 3 rd branch canal	Dry period											
		平水期	138.31	49.90	219.89	0.00	0.00	630.44	128.03	187.46	1291.38	16.21	
		Normal period											
	三支渠 3 rd branch canal	丰水期	233.45	41.55	208.41	0.00	0.00	416.89	166.13	123.40	991.53	17.77	
		Wet period											
		枯水期	144.00	32.52	143.09	0.00	0.00	564.11	156.13	223.53	1314.34	20.66	
三支渠 3 rd branch canal	Dry period												
	平水期	166.28	39.88	194.06	0.00	0.00	642.88	177.58	187.43	1277.11	14.09		
	Normal period												
三支渠 3 rd branch canal	丰水期	239.48	48.45	207.63	0.00	0.00	456.63	178.60	117.13	948.48	17.30		
	Wet period												
	枯水期												

的 1.23、3.48 倍, 表明较大的比例地表水灌溉驱动了根层土壤盐分洗脱, 导致了地下水中可溶性盐分浓度增加。

3 讨论

2013—2015 年一支渠、二支渠和三支渠控制范围内引黄水和地下水灌溉量用水比例介于 0.72—1.03、2.50—2.63、0.65—1.26 之间, 二支渠控制范围内引黄水灌溉的比例最高。2013—2015 年、二支渠 0—100 cm 根层土壤盐分累积量低于一支渠、三支渠, 降幅介于 1.63%—8.90%, 一支渠、二支渠、三支渠 0—100 cm

根层土壤盐分标准偏差分别为 0.0557、0.0524、0.0552, 表明较多的引黄水灌溉降低了根层土壤盐分累积、驱动了根层土壤盐分垂向均匀分布^[16], 值得注意的是, 2013—2015 年 0—100 cm 典型区根层土壤盐分标准偏差分别为 0.0636、0.0510、0.0290, 说明引黄灌溉对根层土壤盐分的调控效果逐渐减弱。此外, 2015 年引黄灌溉区域地下水溶解性总固体较 2014 年增加了 18.66%, 较大比例的引黄灌溉区域地下水溶解性总固体增幅明显高于较小比例的引黄灌溉区域, 以上结果表明, 由于灌溉和降水驱动了根层土壤盐分洗脱, 导致了土壤盐分向地下水中迁移和累积。

沿黄井渠结合灌区引黄灌溉和降水是调控根层土壤盐分重要措施之一。对比 2013 年同期, 2014 和 2015 年 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 面积减少明显, 这主要是由于降水淋洗和灌溉调控作用^[26], 特别是 2013—2015 年、二支渠控制范围 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 面积均小于一支渠、三支渠, 这也说明较大比例的引黄灌溉抑制了土壤盐分的表聚; 2014 年典型区 0—20 cm 根层土壤盐分均值大于 $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的面积较 2013 年减少了 65.26%, 这主要是因为 2014 年汛期降水量较 2013 年增加了 30.81%, 这与方生等^[27]研究结果一致。从 3 年的区域 0—100 cm 土层土壤脱盐率来看, 一支渠、二支渠、三支渠控制范围内 0—100 cm 土壤脱盐率分别为 1.14%、5.90% 和 0.88%, 特别是二支渠控制范围 0—20 cm 土壤脱盐率达到 22.49%, 表明较大比例的引黄水灌溉驱动了土壤盐分垂向运动^[28], 证实较大比例的引黄水灌溉有效消除了土壤盐分障碍因子的形成^[29]。

对比 2014 年同期, 2015 年平水期典型区域地下水溶解性总固体达到 $1\ 038.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较 2014 年增加了 14.81%, 2015 年枯水期典型区域地下水溶解性总固体达到 $1\ 213.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较 2014 年增加了 22.67%, 2015 年丰水期典型区域地下水溶解性总固体达到 $1\ 179.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较 2014 年增加了 18.52%, 李小玉等^[30]研究认为日益加剧的灌溉活动和地下水开采使地下水反复消耗和浓缩, 加剧了地下水水质劣化, 这与本文研究结果一致。本研究中 2014 年典型区平水期地下水钠吸附比 (sodium adsorption ratio, SAR) 均超过 18, 依据宋新山等^[31]研究提出的农业灌溉水碱化危害程度分级标准, SAR18 作为碱化危害程度中等和高的分界值, 表明 2014 年典型区地下水不适宜作为灌溉水源, 通过地表水地下水联合利用、降水补充地下水等, 2015 年平水期地下水 SAR 均低于 18 分级值, 对比 2014 年同期, 一支渠、二支渠和三支渠控制范围地下水 SAR 分别降低了 23.58%、36.82% 和 53.37%, 表明地表水地下水联合利用改善了地下水灌溉水质。

本研究仅针对 3 年典型区域土壤、地下水盐分离子演变特征开展了研究, 2013—2015 年降水年内分布特征及年际变化并不一致, 因此年内降水对区域土壤脱盐及地下水化学特征影响差异明显^[32], 今后仍需开展不同水文年型降水对区域土壤-地下水系统水盐演变及灌区尺度用水模式下土壤-地下水生态环境效应研究, 从而更好地揭示适应于华北井渠结合灌区不同

水文、气象、种植方式特点的渠井用水模式。

4 结论

华北典型井渠结合灌区较大用水比例抑制了土壤盐分的表聚, 特别是表层土壤含盐量大于 $0.32 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 面积增加最少; 对比 2013 年同期, 2014、2015 年不同用水比例下 0—20 cm 土壤脱盐率增加明显, 特别是 0—20 cm 土壤脱盐率与用水比例成正比, 从 3 年的区域 0—100 cm 土层土壤脱盐率来看, 较大比例地表水灌溉促进了耕层土壤的脱盐; 2013—2015 年典型区域地下水水化学特征总体表现为, 地下水中阳离子由枯水期钙钠型转化为平水期的钠钙型, 平水期地下水水化学相具有强烈的碱化趋势, 2015 年平水期、丰水期地下水钠吸附比较 2014 年同期降幅明显, 表明地表水地下水联合利用短期内改善了灌区地下水水质。因此, 华北井渠结合灌区可以通过加大渠灌用水比例, 降低根层土壤盐分表聚, 同时改善平水期地下水水质, 从而保障井渠结合灌区农业安全, 改善灌区生态环境。

References

- [1] FLOWERS T J. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 307-319.
- [2] ROZEMA J, FLOWERS T. Crops for a salinized world. *Science*, 2008, 322(5907): 1478-1480.
- [3] 魏由庆. 从黄淮海平原水盐均衡谈土壤盐渍化的现状和将来. *土壤学进展*, 1995, 23(2): 18-25.
WEI Y Q. Soil salinization present and future from water and salt balance of Huang-Huai-Hai Plain. *Progress in Soil Sciences*, 1995, 23(2): 18-25. (in Chinese)
- [4] 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理. 石家庄: 河北人民出版社, 1985.
SHI Y C, XIN D H. *Water and Salt Movement and Comprehensive Treatment of Waterlogging and Saline in Huang-Huai-Hai Plain*. Shijiazhuang: Hebei People's Publishing House, 1985. (in Chinese)
- [5] 贾大林, 甘晓松. 黄淮海平原治理与农业开发. 北京: 中国农业科技出版社, 1989.
JIA D L, GAN X S. *Treatment and Agricultural Development in Huang-Huai-Hai Plain*. Beijing: China's Agricultural Science Press, 1989. (in Chinese)
- [6] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 黄元仿, 钟秀丽, 龚道枝, 霍再林, 刘恩科. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1149-1157.

- MEI X R, KANG S Z, YU Q, HUANG Y F, ZHONG X L, GONG D Z, HUO Z L, LIU E K. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(6): 1149-1157. (in Chinese)
- [7] 李平, 齐学斌, Magzum Nurolla, 黄仲冬, 梁志杰, 乔冬梅. 渠井用水比对灌区降水响应及其环境效应分析. 农业工程学报, 2015, 31(11): 123-128.
- LI P, QI X B, MAGZUM N, HUANG Z D, LIANG Z J, QIAO D M. Response of precipitation to ratio of canal to wells and its environmental effects analysis in combined well-canal irrigation area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 123-128. (in Chinese)
- [8] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 李克南. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-110.
- GAO J Q, YANG X G, DONG C Y, LI K N. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 99-110. (in Chinese)
- [9] 覃志豪, 唐华俊, 李文娟, 赵书河. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向. 中国农业资源与区划, 2013, 34(5): 1-7.
- QIN Z H, TANG H J, LI W J, ZHAO S H. Progress and directions in studying the impacts of climate change on agriculture and grain production in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(5): 1-7. (in Chinese)
- [10] 齐学斌, 樊向阳, 王景雷, 高胜国. 井渠结合灌区水资源高效利用调控模式. 水利学报, 2004, 35(10): 119-124.
- QI X B, FAN X Y, WANG J L, GAO S G. Optimal allocation of water resources in well-canal combined irrigated area for high efficient utilization of water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(10): 119-124. (in Chinese)
- [11] WU X, ZHENG Y, WU B, TIAN Y, HAN F, ZHENG C. Optimizing conjunctive use of surface water and groundwater for irrigation to address human-nature water conflicts: A surrogate modeling approach. *Agricultural Water Management*, 2016, 163(1): 380-392.
- [12] PARNA P, ARMAGHAN A, REZA K. A heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water Resources Management*, 2015, 29(11): 3905-3918.
- [13] 周维博, 曾发琛. 井渠结合灌区地下水动态预报及适宜渠井用水比分析. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 6-9.
- ZHOU W B, ZENG F C. Groundwater level forecast and the appropriate channel and well water analysis of irrigation area combined with well and canal. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(1): 6-9. (in Chinese)
- [14] 孙月, 毛晓敏, 杨秀英, 佟玲, 唐敏华. 西北灌区地下水矿化度变化及其对作物的影响. 农业工程学报, 2010, 26(2): 103-108.
- SUN Y, MAO X M, YANG X Y, TONG L, TANG M H. Variation of groundwater salinity and its influence on crops in irrigation area of Northwest China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 103-108. (in Chinese)
- [15] LENG G, HUANG M, TANG Q, LEUNG L. A modeling study of irrigation effects on global surface water and groundwater resources under a changing climate. *Journal of Advances Modelling Earth Systems*, 2015, 7(3): 1285-1304.
- [16] 陈亚新, 屈忠义, 高占义. 基于 ANN 技术的大型灌区节水改造后农田水环境预测. 农业工程学报, 2009, 25(1): 1-5.
- CHEN Y X, QU Z Y, GAO Z Y. Prediction of farmland water environment after reconstruction of water-saving in the large-scale irrigation district based on the ANN technology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 1-5. (in Chinese)
- [17] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 严明疆, 王金哲. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1-10.
- ZHANG G H, FEI Y H, LIU C H, YAN M J, WANG J Z. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese)
- [18] RAJESH R, BRINDHA K, ELANGO L. Groundwater quality and its hydrochemical characteristics in a shallow weathered rock aquifer of southern India. *Exposure and Health*, 2015, 7(4): 515-524.
- [19] DAVID M, 李保国, 黄峰. 水与可持续发展—未来农业用水对策方案及综合评估. 天津: 天津科技翻译出版有限公司, 2014.
- DAVID M, LI B G, HUANG F. *Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Translation and Publishing Corporation, LTD, 2014. (in Chinese)
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed.* Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [21] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 龙桃. 干旱区农田灌溉前后土壤水盐时空变异性研究. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 491-499.
- LI B F, XIONG H G, ZHANG J B, LONG T. Spatial and temporal variations in soil water and salt in arid areas before and after irrigation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 491-499. (in Chinese)
- [22] 杜黎君. 2015 年厄尔尼诺背景下新乡气候变化特征及影响. 河南科技学院学报(自然科学版), 2016, 44(3): 34-38.

- DU L J. Characteristics and impacts of Xinxiang's climate change in the background of EL Nino in 2015. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(3): 34-38. (in Chinese)
- [23] 王海江, 石建初, 张花玲, 盛建东, 马兴旺. 不同改良措施下新疆重度盐渍土壤盐分变化与脱盐效果. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 102-111.
- WANG H J, SHI J C, ZHANG H L, SHENG J D, MA X W. Soil salinity dynamic change and desalting effect under different improvement measures in severe salinity soil in Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 102-111. (in Chinese)
- [24] KARMEGAM U, CHIDAMBARAM S, PRASANNA M V, SASIDHAR P, MANIKANDAN S, JOHNSONBABU G, DHEIVANAYAKI V, PARAMAGURU P, MANIVANNAN R, SRINIVASAMOORTHY K, ANANDHAN P. A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model. *Chinese Journal Geochemistry*, 2011, 30(4): 490-495.
- [25] WEN X, WU Y, SU J, ZHANG Y, LIU F. Hydrochemical characteristics and salinity of groundwater in the Ejina Basin, Northwestern China. *Environmental Geology*, 2005, 48(6): 665-675.
- [26] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 新疆铁干里克绿洲水文过程对土壤盐渍化的影响. *地理学报*, 2008, 63(7): 714-724.
- ZHOU H H, CHEN Y N, LI W H. Effect of oasis hydrological processes on soil salinization of Tikanlik Oasis in the lower Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 714-724. (in Chinese)
- [27] 方生, 陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响. *土壤学报*, 2005, 42(5): 730-736.
- FANG S, CHEN X L. Influence of atmospheric precipitation on soil leaching and desalinization in the North China Plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 730-736. (in Chinese).
- [28] 肖国举, 张强, 李裕, 张峰举, 王润元. 气候变暖对宁夏引黄灌区土壤盐分及其灌水量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 7-13.
- XIAO G J, ZHANG Q, LI Y, ZHANG F J, WANG R Y. Impact of climatic warming on soil salinity and irrigation amount of Yellow River Irrigation Areas in Ningxia Hui Autonomous Region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 7-13. (in Chinese)
- [29] DAI Y, SENGE M, ITO K, ONISHI T, YOSHIYAMA K. Experimental evaluation of irrigation methods for soil desalinization. *Paddy and Water Environment*, 2015, 13(2): 159-165.
- [30] 李小玉, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异. *地理学报*, 2005, 60(2): 319-327.
- LI X Y, SONG D M, XIAO D N. The variability of groundwater mineralization in Minqin Oasis. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 319-327. (in Chinese).
- [31] 宋新山, 邓伟, 章光新, 闫百兴. 钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用. *水利学报*, 2000, 31(7): 70-76.
- SONG X S, DENG W, ZHANG G X, YAN B X. Sodium adsorption ratio and its application to appraisal of alkali characteristics of water. *Shuili Xuebao*, 2000, 31(7): 70-76. (in Chinese)
- [32] 张妙仙, 杨劲松, 李东顺. 特大暴雨作用下土壤盐分运移特征研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 47-49.
- ZHANG M X, YANG J S, LI D S. Salt migration characteristics of silt loam soil by rainstorm. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 47-49. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)