排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 10 月 Oct. 2018 | 第 36 卷 第 10 期 Vol. 36 No. 10
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.1045

河套灌区土壤盐分时空变化特征及影响因素

常晓敏

常晓敏[1,2]，王少丽[1,2*]，陈皓锐[1,2]，付小军[3]，徐楠楠[1,2]，杨晓萍[4]
（1. 中国水利水电科学研究院水利研究所，北京 100038；2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心，北京 100048；3. 内蒙古河套灌区解放闸灌域沙壕渠试验站，内蒙古 陕坝 015400；4. 解放闸灌域管理局，内蒙古 杭锦后旗 015400）

摘要：为了研究河套灌区土壤含盐量演变特征及主要影响因素，以解放闸灌域为研究区，以 0～100 cm 深不同土层土壤含盐量及引排水量、地下水埋深、地下水矿化度、降雨量、蒸发量等数据为基础，结合研究区耕地及盐荒地面积变化情况，定量估算了 2006—2016 年耕地及盐荒地 1 m 深土层平均土壤盐分总量变化，定性分析了土壤含盐量变化动态，建立了 1 m 深土层土壤含盐量预测模型. 结果表明：近 10 a 来，灌域年均积盐量为 57.12 万 t/a，其中 46.12% 积累在 1 m 土层内，其余则迁移至 1 m 土层以下和地下水中积聚. 1 m 土层中，耕地盐分整体上减小 6.34%，而盐荒地则增加 86.8%；主成分分析结果表明灌区地下水埋深、排水量及年蒸发量对土壤含盐量影响最大，其次为地下水矿化度、引水量及降雨量；逐步回归分析表明采用地下水埋深单因子即可预测耕地 1 m 深土层土壤含盐量，相关系数可达 0.732.

关键词：土壤含盐量；演变特征；影响因素；逐步回归；主成分分析
中图分类号：S274.1　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)10-1000-06

常晓敏，王少丽，陈皓锐，等. 河套灌区土壤盐分时空变化特征及影响因素[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(10)：1000-1005.
CHANG Xiaomin，WANG Shaoli，CHEN Haorui，et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil salinity in Hetao Irrigation District[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(10)：1000-1005.(in Chinese)

Spatiotemporal changes and influencing factors of soil salinity in Hetao Irrigation District

CHANG Xiaomin[1,2]，*WANG Shaoli*[1,2*]，*CHEN Haorui*[1,2]，*FU Xiaojun*[3]，*XU nannan*[1,2]，*YANG Xiaoping*[4]
(1. Department of Irrigation and Drainage，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing 100038，China；2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing，Beijing 100048，China；3. Shahaoqu Experiment Station of Hetao Irrigation District，Shanba，Inner Mongolia 015400，China；4. Jiefangzha Administration Bureau of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia，Hanggin Rear Banner，Inner Mongolia 015400，China)

Abstract：To study the soil salinity dynamics and the main influencing factors in Hetao Irrigation District，the Jiefangzha Irrigation Scheme (JFIS) was selected as a study area. With the soil salinity in different soil layers，irrigation water，drain discharge，groundwater depth，salt concentration of the groundwater，rainfall，evaporation，etc. as the data foundation，combining with the cultivated land

收稿日期：2018-04-25；**修回日期**：2018-06-04；**网络出版时间**：2018-07-16
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180716.1548.028.html
基金项目："十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0501301，2017YFC0403302，2017YFC0403503，2017YFC0403205)；国家自然科学基金资助项目(51779273，51779274)
第一作者简介：常晓敏(1988—)，女，内蒙古乌兰察布人，博士研究生(xmchang2013@163.com)，主要从事农业水土资源与环境研究.
通信作者简介：王少丽(1963—)，女，江苏无锡人，教授级高级工程师(shaoliw@iwhr.com)，主要从事农田灌排理论与技术、农业水环境保护研究.

and salt wasteland area changes, the total soil salinity changes of 1-m-deep soil layer both in the cultivated land and salt wasteland during 2006—2016 was quantitatively estimated, the soil salinity dynamics was analyzed, and a prediction model for soil salinity of 1-m-deep soil layer was established. The results show that the annual salt accumulation is 571 200 t/y, 46.12% of which accumulates in 1-m-deep soil layer and the rest migrates to deep soil or groundwater. The soil salinity of 1-m-deep soil layer decreases by 6.34 $ in the cultivated land, while increases by 86.8% in salt wasteland. The results of principle component analysis show that groundwater depth, drain discharge and annual evaporation have the greatest impact on soil salinity, followed by salt concentration of the groundwater, irrigation water and rainfall. Stepwise regression analysis indicates that the soil salinity of 1-m-deep soil layer in the cultivated land is significantly related to groundwater depth, and the correlation coefficient can research 0.732.

Key words: soil salinity; evolutionary characteristics; influencing factors; stepwise regression; principal component analysis

土壤盐渍化是全球性的问题之一，也是影响干旱、半干旱地区农田生态环境及粮食安全的主要因素. 土壤含盐量与气候、土壤质地、地形、植被、地下水等自然因素及灌溉、排水、施肥等人类活动有着密切的关系. 土壤盐分时空变化特征及影响因素分析是了解灌区盐分迁移变化、制定盐渍化调控对策的关键，近年来，国内外对土壤盐渍化时空演变特征及影响因素做了较多研究[1-2]. 刘显泽等[3]根据内蒙古义长灌域野外实测资料，分析了土壤含盐量在垂直剖面上的分布特征及变化规律，探讨了地下水埋深和地下水矿化度对土壤盐分运移的影响，江红南等[4]应用灰色关联法分析了不同影响因子对新疆渭干河灌区土地盐渍化时空变化的影响. YU 等[5]通过遥感和 GIS 手段，对盐渍化动态变化及主要影响因素进行分析研究，并取得较多成果，但这些成果多是分析盐渍化土地面积的变化情况，而关于变化条件下土壤盐分含量的定量分析研究相对较少. 此外，由于土壤盐分的积累和消减是一个连续的时空动态变化过程，以往研究多以某一时间或田间尺度土壤盐分变化特征为研究重点，缺少较长时间序列及大空间尺度上土壤盐分定量变化及影响因素的研究. 文中以干旱半干旱河套灌区解放闸灌域为研究区，采用统计分析方法，从长时间序列上分析土壤含盐量时空演变特征及影响因素，并进一步探讨土壤层盐分迁移变化情况及与各影响因素之间的关系，以期为盐渍化防治、改良和有效利用提供一定的理论依据及指导意义.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

解放闸灌域位于河套灌区上游，南北长约 87 km，东西宽约 78 km，呈三角形状，地形是西南高、东北低，海拔高度为 1 032 ~ 1 046 m，如图 1 所示.

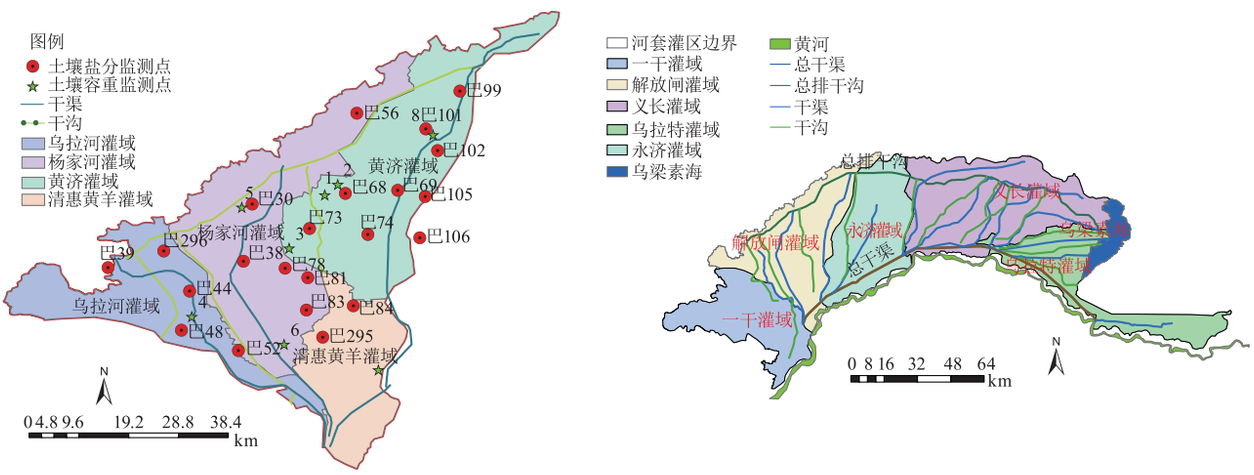

图 1　解放闸灌域土壤墒情及盐分监测点位置示意图

Fig. 1　Location of soil moisture and salinity monitoring points in Jiefangzha Irrigation Scheme

灌域内共有3条干渠,16条分干渠.灌域总控制面积21.57万hm^2,灌溉面积14.21万hm^2,其中耕地、林果地、牧草地面积分别为12.19万,0.55万,1.46万hm^2.灌域气候干燥,降雨少、蒸发量大,无霜期短,日照时间长,年平均降水为155 mm,其中70%左右的降雨集中于7—9月,年平均蒸发量为2 096.4 mm,年均日照时数为3 181 h,多年平均无霜期为130 d,年平均风速为2~3 m/s,是典型的无灌溉即无农业的地区,多年平均引排水量分别为13亿m^3和2亿m^3左右[1],多年平均地下水埋深为1.85 m.

1.2 数据来源及分析方法

1.2.1 数据来源

灌域内设有日常地下观测井55眼,每隔5 d监测1次地下水埋深数据,其中有27眼井同步观测地下水矿化度,22眼井附近每年灌水前土壤剖面按[0,10),[10,20),[20,40),[40,70),[70,100] cm分层采样室内测量土壤含水率及含盐量,土壤容重以灌域均匀布设的8个点进行测定,作为典型代表.其中室内测定了土壤电导率$EC_{1:5}$值,土壤全盐量计算公式[6]为

$$SSC = 6.9 \cdot EC_{1:5} - 0.2 \quad (R^2 = 0.998\ 8), \tag{1}$$

式中:SSC为土壤全盐量,g/kg;$EC_{1:5}$为土水比1∶5的土壤浸提液电导率,dS/m.

以不同观测井地下水埋深及地下水矿化度均值分别作为灌域地下水埋深及地下水矿化度的代表值,以[0,10),[10,20),[20,40] cm深土层加权平均值作为0~30 cm表土含盐量值[7],以不同土层加权平均值作为1 m深土层含盐量值.灌域引黄灌溉水矿化度在0.55~0.74 g/L变化,均值约为0.60 g/L.研究区春季蒸发量较大,土壤返盐严重,盐分容易集聚于表土层,而冬季降雨和蒸发量较小,且不需要进行灌溉,土壤含盐量相对稳定.因此,首先依据中国土壤盐碱化量化分级指标,选取每年一水前(4月中旬)0~30 cm含盐量值进行盐渍化量级划分并分类统计.然后以当年秋浇前(9月中旬)到次年秋浇前为年时间段,选取每年秋浇前土壤含盐量数据及同期月均地下水埋深、地下水矿化度、年引排水量、年降雨量及蒸发量并分别命名为X_1—X_6进行土壤含盐量与主要影响因素分析.

1.2.2 分析方法

基于2006—2016年土壤含盐量监测点数据,定性分析1 m深不同土层土壤含盐量变化趋势;根据盐渍化量级划分结果,定量估算耕地及盐荒地1 m深土层土壤盐分总量变化情况,进而定性分析土壤含盐量时空演变特征;运用主成分分析法,探讨土壤盐分含量变化的主要驱动因子,并采用逐步回归法,建立1 m深土层土壤含盐量线性回归预测模型.

2 结果与分析

2.1 土壤盐分变化特征

2.1.1 土壤盐分时间变化

人类活动对灌区土壤含盐量的影响,不仅表现在空间变化上,也反映在时间序列变化上.图2为解放闸灌域耕地和盐荒地一水前及秋浇前不同层平均土壤含盐量时间变化图.由图可看出耕地一水前不同层土壤含盐量呈减小趋势,秋浇前呈缓慢增加趋势,而盐荒地一水前土壤盐分含量呈先缓慢减小后急剧增加趋势,秋浇前呈增加趋势.整体上,随着时间的演变,耕地土壤含盐量增加较少,而盐荒地上增加较大.同时,秋浇前土壤盐分含量受灌溉、降雨等影响较大,含盐量变化较大,特别是表土含盐量不稳定,耕地土壤剖面盐分变化呈现表土盐分大、土壤下层盐分小的现象.同年秋浇前土壤含盐量整体略高于一水前,说明大量的秋浇灌溉将土壤上层部分盐分淋洗到深层的土壤或地下水中,而作物生育期灌溉增加了秋浇前上层土壤盐分.

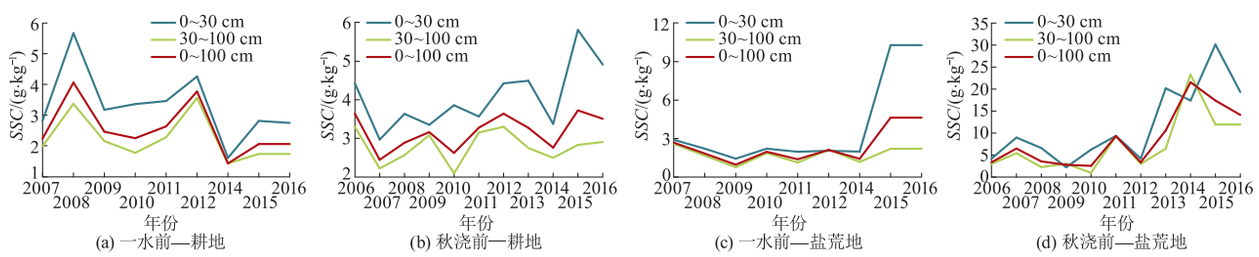

图2 耕地及盐荒地不同层平均土壤盐分含量时间变化规律

Fig. 2 Average soil salinity dynamics in different soil layers of cultivated land and salt wasteland

2.1.2　土壤盐分平衡分析

灌区的盐分主要来自引黄灌溉,文中对于降雨及农田施肥等来源暂不计入,因此灌域盐分的平衡取决于引黄灌溉输入盐分和排水输出盐分的变化. 图 3 为解放闸灌域年进盐量、排盐量及积盐量 S 变化图,可以看出,2007—2016 年,平均引盐量、排盐量、积盐量分别为 71.36 万,14.27 万,57.12 万 t/a,灌域盐分增幅虽然呈缓慢减小趋势,但引进的盐分只有 20% 左右可通过排水排出,80% 左右的盐分滞留在灌域内,使得灌域总体呈积盐趋势. 灌域每年引盐量大于排盐量,处于积盐状态,为了进一步了解灌域盐分迁移变化趋势,定量计算了耕地和盐荒地 1 m 深土层土壤盐分总量,计算公式为

$$M = SSC \times r \times h \times A \times 10^{-3}, \qquad (2)$$

式中:M 为 1 m 土层盐分总量,kg;SSC 为耕地或盐荒地 0 ~ 100 cm 土层平均土壤含盐量均值,g/kg;r 为 0 ~ 100 cm 深土壤容重均值;h 为 1 m 深不同土层深度;A 为耕地或盐荒地面积,m^2.

根据式(2)和耕地及盐荒地面积,计算耕地及盐荒地 1 m 深土层土壤盐分总量,如表 1 所示,研究区 1 m 深土层总盐量呈增加趋势,其中 2007—2011 年共增加了 142.37 万 t,2011—2016 年共增加 121.06 万 t,但 1 m 深土层总积盐量占整个解放闸灌域同期总积盐量的 46.12%,说明随着时间的演变,引入灌域的盐量部分聚集在 1 m 深土壤中,部分进入深层土壤或地下水中. 2007—2016 年,耕地总盐量呈先增加后减小的趋势,且 1 m 土层总盐量减少 6.34%,而盐荒地 1 m 土层总盐量增加了 86.8%. 这主要是由于灌溉期耕地表层土壤发生脱盐,盐分进入深层土壤或排向低洼盐荒地或排出灌区,而盐荒地土壤长期处于蒸发阶段,且地势较低,灌溉降雨又促进周边耕地土壤盐分随水分向盐荒地运移,使得表层土壤含盐量越来越高,从而导致盐荒地土壤盐分含量呈增大的趋势.

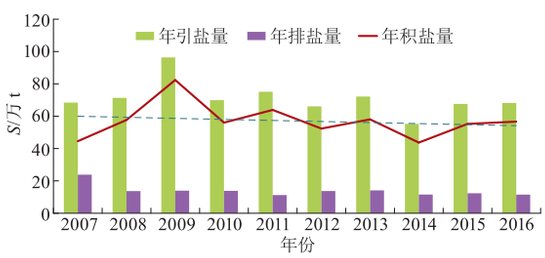

图 3　解放闸灌域年进盐量、排盐量、积盐量变化

Fig. 3　Variation of annual salt inflow, discharge and accumulation

表 1　研究区耕地、盐荒地面积及 1 m 深土层土壤盐分总量

Tab. 1　Area and total soil salinity of cultivated land and salt wasteland land in study area

土地类型	A/100 万 m^2			M/万 t			数据来源
	2007	2011	2016	2007	2011	2016	
耕地	1 161.21	1 187.54	1 113.34	370.93	393.35	347.40	解放闸灌域管理局
盐荒地	352.01	352.01.	352.01	330.84	451.02	618.03	李亮等[8](2015)

2.2　土壤盐分主要影响因素确定

2.2.1　主要影响因素变化

图 4 为解放闸灌域降雨量 P、蒸发量 ET、地下水埋深 D_w、引排水量 G_d 随时间变化情况.

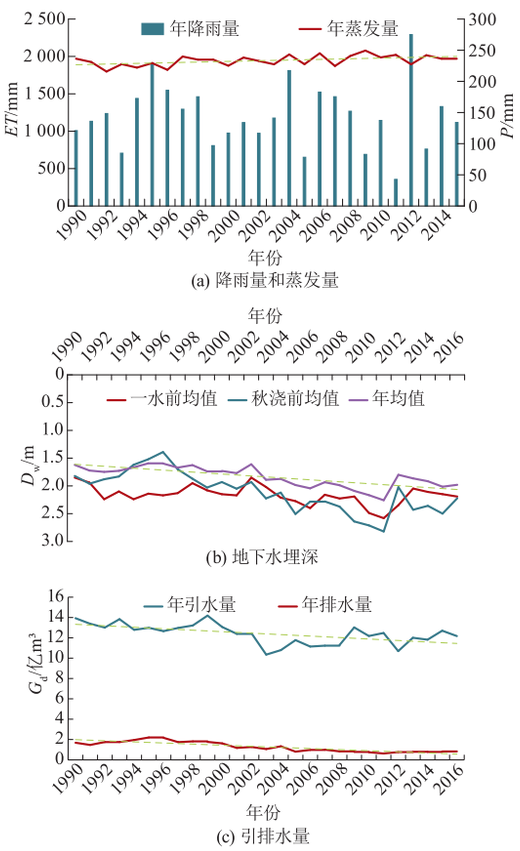

图 4　解放闸灌域降雨量、蒸发量、地下水埋深、引排水量时间变化图

Fig. 4　Time variation of annual rainfall, evapotranspiration, groundwater depth, and water intake and drainage volume

从图 4a 可看出,研究区年际蒸发量波动较小,而降雨量年际变化较大,短期较强的降雨量会对灌区土壤盐分起到淋洗作用,同时汛期较强的降雨及空间变异性也会引起局部地区地下水位的抬升,使地下水埋深 D_w 减小. D_w 越浅,毛管水上升路径越短,在蒸发作用下,土壤积盐就越严重. 从 1990—2016 年,D_w 总体上呈增大趋势,其中在 1999 年以

前，D_w 年际变化不大，2000 年以来，D_w 明显增大，2002—2006 年增加了 0.43 m，2007—2011 年增加了 0.33 m. 而2012 年突然减小，是由于2012 年河套灌区发生了 50 a 一遇的特大暴雨，使得短期内 D_w 急剧减小，之后又呈现增大趋势. 灌域 D_w 年内波动变化较大，当 D_w 较大时，土壤中盐分与地下水盐关联度较小，因此，随着灌区节水改造的推进，D_w 逐渐增大，地下水矿化度单一因素对土壤含盐量的影响也将减弱. 图 4c 可看出，随着时间的演变，灌域引排水量均呈减少的趋势，其中，1990—1999 年引水量较大，灌溉入渗对地下水的补充相对丰富，这段时期内 D_w 相对较小. 1999 年开始，随着灌区节水改造工程大规模开展，灌区引排水量逐渐减少. 可见灌排发展对盐渍化有较大的影响，在发展过程中应予以重视.

2.2.2 盐分主控因子的确定

采用主成分分析法提取影响土壤含盐量的主要因素. 由于各影响因子的量纲不同，在计算之前将原始数据进行标准化以消除量纲的影响，并计算各变量的特征值、方差贡献率和累积贡献率，根据特征值大于 1.0 的提取原则，提取出两个主成分，且仅前两个主成分能反映 6 个影响因素的 77.02% 的信息，可以接受. 其中第一主成分 $F1$ 可以解释 46.88% 原变量的信息，包含的信息最多，第二主成分 $F2$ 可解释 30.12%. 根据中心化后的特征向量值列出土壤含盐量主成分表达式为

$$F1 = -0.578x_1 + 0.191x_2 + 0.312x_3 + 0.536x_4 + 0.256x_5 - 0.424x_6, \quad (3)$$

$$F2 = -0.038x_2 - 0.510x_2 + 0.591x_3 + 0.251x_4 - 0.504x_5 + 0.269x_6, \quad (4)$$

式中：x_1—x_6 为 X_1—X_6 的标准化变量，分析上述线性表达式可知，$F1$ 在 X_1，X_4 及 X_6 的荷载较大，说明灌区地下水埋深、排水量及蒸发量对第一主因子的影响较大，可解释为灌区排泄项影响因子. $F2$ 在 X_2，X_3 及 X_5 上的荷载较大，可解释为灌区补给项影响因子. 从图 5 可看出，2000 年以前，$F1$ 得分整体相对较大，2000 年以后，$F1$ 得分呈减小趋势，这与灌区的灌排发展等有较大的关系，随着节水改造的推进，灌区引排水量减少，地下水埋深增大，蒸发作用引起的土壤返盐减弱，使得地下水埋深对土壤含盐量的影响趋于减弱. 由于自然条件下年降雨量的随机性，$F2$ 得分年际波动较大，说明受自然气候变化的影响，较强降雨量引起的土壤盐分淋洗以及地下水埋深、排水排盐量等变化对土壤含盐量产生较大的影响. 2000—2008 年，$F2$ 得分整体较大，可能是由于此期间节水改造效益逐渐发挥作用，灌区引水量仍较大，地下水埋深较小，非饱和带土壤水盐与地下水盐关联交互密切，地下水矿化度对土壤盐分含量影响的贡献率也较大. 2008 年以后，随着灌区引水量的减少，地下水位呈下降趋势，土壤中盐分与地下水中可溶性盐的交互作用减小，因此地下水矿化度对土壤含盐量的贡献率较小，$F2$ 值整体上较小.

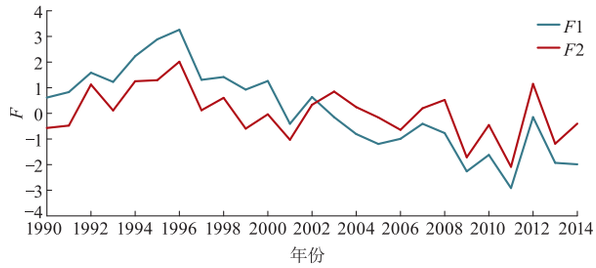

图 5 不同主成分得分时间变化图

Fig. 5 Variation of different principal component scores

2.3 土壤盐分统计预测分析

采用逐步回归分析方法，以上述 X_1—$X_6$6 个主要影响因素为自变量，以耕地 0 ~ 100 cm 土壤含盐量均值为因变量（Y_1），建立耕地 1 m 深土壤含盐量线性回归预测模型，以便为 1 m 深土壤含盐量演变提供相关依据. 表 2 所示为线性回归模型计算成果. 由表可以看出，X_1 单变量移入 1 m 土层含盐量模型，*Pearson* 相关系数为 0.732，说明 73.2% 的 0 ~ 100 cm 土壤含盐量变化可由本模型所解释. 由方差分析表可知，F 统计量都通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，说明回归方程显著，即 0 ~ 100 cm 土壤含盐量与灌域地下水埋深显著相关，1 m 深土层土壤含盐量线性回归模型为

$$Y_1 = 4.799 - 1.146X_1. \quad (5)$$

表 2 模型汇总及回归系数表

Tab. 2 Model summary and regression coefficients

模型	变量已输入	非标准化系数 B	标准误差	标准系数	t	*Sig.*	R	R^2	调整 R^2	标准估计的误差
0 ~ 100 cm 土层	（常量）	4.799	0.97		4.948	0.001	0.732	0.536	0.478	0.292 9
	X_1	−1.146	0.377	−0.732	−3.042	0.016				

应用建立的回归模型对 1 m 深土壤含盐量进行模拟，并将预测与实测盐分值进行比较，如图 6 所示，得出平均绝对误差 *MAE* 为 0.21 g/kg，均方根误差 *RMSE* 为 0.26 g/kg，总体上，土壤含盐量预测值与实测值变化趋势较为一致，可见经过逐步回归筛选出的地下水埋深是具有代表性的，其回归方程可作为研究区 1 m 深土壤含盐量预测的参考依据.

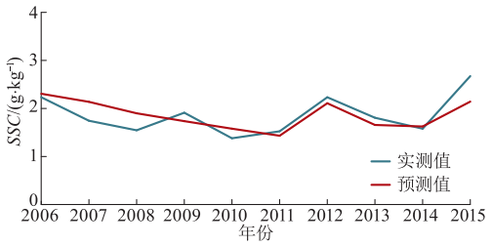

图 6　解放闸灌域 0～100 cm 土层土壤含盐量模拟值与实测值比较图

Fig. 6　Comparing measured and simulated values of soil salinity in 0－100 cm soil layer

3　结　论

土壤含盐量受多种影响因素的综合作用，具有复杂的变化过程及发生机制. 通过对河套灌区解放闸灌域土壤盐分时空演变特征及主要影响因素进行分析，得到主要结论如下：

1）解放闸灌域年均积盐量为 57.12 万 t/a，1 m 深土层总积盐量占整个解放闸灌域同期总积盐量的 46.12%，其余盐分积聚在 1 m 深度以下的土壤和地下水中. 在 1 m 土层范围内，2007—2016 年耕地积盐量减少 6.34%，盐荒地积盐量增加了 86.8%，1 m 土体总盐分的增加主要由盐荒地积盐所致.

2）通过主成分分析，得到了研究区土壤盐分含量的主要影响因素，其中灌区引排水量、地下水埋深以及蒸发量对土壤含盐量的影响最大，其次为地下水矿化度、降雨和气温. 因此，土壤含盐量既与降雨蒸发等自然条件有关，也与人类活动引起的引排水量、地下水埋深、矿化度等有关，需将这些因素综合起来考虑.

3）建立了以地下水埋深为自变量的耕地 1 m 土层盐分预测回归模型，与实测数据对比表明预测精度较好，可为研究区耕地 1 m 深土层土壤含盐量预测提供参考依据.

参考文献(References)

[1] 郑佳伟，史海滨，李正中，等. 内蒙古河套灌区解放闸灌域土壤水盐空间变异性研究［J］. 节水灌溉，2010（2）：52－55.
ZHENG Jiawei，SHI Haibin，LI Zhengzhong，et al. Research on spatial variability of soil water－salt in Jiefangzha Irrigation field of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia［J］. Water saving irrigation，2010（2）：52－55.（in Chinese）

[2] IBRAHIMI M K，MIYAZAKI T，NISHIMURA T，et al. Contribution of shallow groundwater rapid fluctuation to soil salinization under arid and semiarid climate［J］. Arabian journal of geosciences，2014，7（9）：3901－3911.

[3] 刘显泽，岳卫峰，贾书惠，等. 内蒙古义长灌域土壤盐分变化特征分析［J］. 北京师范大学学报（自然科学版），2014（5）：503－507.
LIU Xianze，YUE Weifeng，JIA Shuhui，et al. Variation of soil salinity in the Yichang irrigation district Inner Mongolia［J］. Journal of Beijing Normal University，2014（5）：503－507.（in Chinese）

[4] 江红南，塔西甫拉提·特依拜，丁建丽 等. 新疆渭干河灌区土地盐渍化时空变化影响因子分析［J］. 干旱区地理 2008，31（6）：885－891.
JIANG Hongnan，TASHPOLAT Tiyip，DING Jianli，et al. Tempo－spatial change driving forces of land salinization in Weigan Irrigated Area，Xinjiang［J］. Arid land geography，2008，31（6）：885－891.（in Chinese）

[5] YU R H，LIU T X，XU Y P，et al. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China［J］. Agricultural water management，2010，97（12）：1952－1960.

[6] FENG Z Z，WANG X K，FENG Z W. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District，China［J］. Agricultural water management，2005，71（2）：131－143.

[7] 王少丽，焦平金，许迪，等. 新疆旱区浅层土盐分动态及其影响因素［J］. 排灌机械工程学报，2013，31（7）：623－628.
WANG Shaoli，JIAO Pingjin，XU Di，et al. Variation trends and influencing factors of shallow soil salinity in arid area of Xinjiang［J］. Journal of drainage and irrigation machinery engineering，2013，31（7）：623－628.（in Chinese）

[8] 李亮，李美艳，王世锋，等. 河套灌区解放闸灌域盐荒地积盐量分析［J］. 排灌机械工程学报，2015，33（5）：434－441.
LI Liang，LI Meiyan，WANG Shifeng，et al. Analysis of salt accumulation in wasteland of Jiefangzha irrigation field in Hetao irrigation district［J］. Journal of drainage and irrigation machinery engineering，2015，33（5）：434－441.（in Chinese）

（责任编辑　徐云峰）