

网络出版时间:2015-06-30 13:47

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.08.013

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150630.1347.013.html>

# 盐渍化灌区水盐田间尺度时空 分布及关联分析

马金慧<sup>1</sup>, 杨树青<sup>1</sup>, 史海滨<sup>1</sup>, 丁雪华<sup>1</sup>, 韩文光<sup>2</sup>, 杜丽云<sup>3</sup>

(1 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2 河套灌区永济灌域管理局, 内蒙古 临河 015000;  
3 鄂尔多斯市东胜区水政水资源局, 内蒙古 东胜 017000)

**[摘要]** 【目的】分析干旱盐渍化灌区非饱和-饱和带水盐的时空分布特征及其内部关联度, 为内蒙古河套灌区盐渍化防治提供理论依据。【方法】运用经典统计学和地质统计学方法, 分析了内蒙古河套灌区隆胜试验示范区作物播种前、生育期、收割后土壤水盐的时空变异特征, 并利用灰色关联分析对不同地下水埋深条件下的土壤含水量、土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度进行了交叉综合排序。【结果】内蒙古河套灌区隆胜试验示范区在播种前、生育期、收割后的土壤含水量和地下水埋深均呈中度偏弱变异性, 而表层(0~40 cm)土壤含盐量和地下水矿化度均呈中度偏强变异性。表层土壤含水量、含盐量均表现出北高南低的空间分布趋势, 地下水埋深呈北浅南深趋势, 地下水矿化度分布为西北高东南低。对不同地下水埋深条件下的水盐因子进行关联度分析发现, 当地下水埋深年均值为 1.5 m 时, 对地下水埋深关联度最大的因子为土壤含水量(关联度为 0.726 1), 土壤含水量、土壤含盐量和地下水矿化度均以地下水埋深为最大关联因子(关联度依次为 0.724 0, 0.683 2, 0.643 2); 在地下水埋深年均值为 2.0 m 条件下, 各因素间灰色关联度达到相对平衡状态; 当地下水埋深年均值为 2.5 m 时, 土壤含盐量与土壤含水量、地下水埋深与地下水矿化度互为关联度最大的因子。【结论】建议采取合理措施降低研究区北部地下水埋深, 防止区域土壤盐渍化加剧。

**[关键词]** 水盐分布; 盐渍化灌区; 灰色关联分析; 克里格插值; 河套灌区

**[中图分类号]** S181

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2015)08-0165-09

## Field scale spatiotemporal distribution and correlation analysis of water-salt in salinization irrigation district

MA Jin-hui<sup>1</sup>, YANG Shu-qing<sup>1</sup>, SHI Hai-bin<sup>1</sup>, DING Xue-hua<sup>1</sup>,  
HAN Wen-guang<sup>2</sup>, DU Li-yun<sup>3</sup>

(1 *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;*

2 *Yongji Administration Bureau Experiment Station, Linhe, Inner Mongolia 015000, China;*

3 *Erdos City Dongsheng District of Water Administration and Water Resources Bureau, Dongsheng, Inner Mongolia 017000, China*)

**Abstract:** 【Objective】Spatial and temporal distribution characteristic and inner correlation of water-salt in unsaturated-saturated zone at regional scale in drought and salinization irrigation area were analyzed to provide theoretical basis for salinization prevention and control in Inner Mongolia Hetao Irrigation District. 【Method】The spatial and temporal distribution characteristics of water and salt were analyzed at the

〔收稿日期〕 2014-01-27

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目“内蒙古河套灌区农田水土环境安全因子限制下引黄水量阈值与环境预报研究”(51469021); 内蒙古自治区自然科学基金项目“河套灌区影响农田生态安全的环境因子试验研究”(2014MS0335); 内蒙古水利科技项目“河套灌区影响作物生长的限制因子筛选研究”(NSK201407)

〔作者简介〕 马金慧(1984—), 女(满族), 内蒙古通辽人, 博士, 主要从事水土环境模拟与预测研究。E-mail: nmmajinhui@yeah.net

〔通信作者〕 杨树青(1966—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail: nmdysq@126.com

stages of before sowing, plating season and after harvest in Longsheng experimental demonstration zone in Inner Mongolia Hetao Irrigation District using classical statistics and geostatistics. Besides, grey relational degree method was used to conduct cross comprehensive sorting on soil moisture content, soil salinity, groundwater table, and groundwater salinity at different depths. 【Result】 In Longsheng test demonstration region in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, soil water content and groundwater depth before seeding, at planting date and after harvest had moderate to weak variability. The surface soil (0—40 cm) salt content and groundwater salinity showed strong to moderate variability. Surface soil moisture and salt content showed high variability in north and low in south, and groundwater depth distribution was characterized by low in north and high in south, while the groundwater salinity distribution was characterized by low in southeast and high in northwest. The relational grade analysis between water and salt under different depths of groundwater showed that the highest correlation factor for the depth of groundwater was soil moisture (correlation of 0.726 1) when the groundwater depth average was about 1.5 m. Groundwater depth was also the maximum correlation factor for soil moisture, salt content and groundwater salinity in groundwater with correlation coefficients of 0.724 0, 0.683 2, and 0.643 2, respectively. When the groundwater depth average was 2.0 m, the grey relational degree between every factor reached relative balanced state. When the groundwater depth was 2.5 m, soil water content and salt content had the biggest correlation factor as well as between groundwater depth and mineralization of groundwater. 【Conclusion】 Taking reasonable measures to lower the groundwater level in northern was suggested to prevent the enhancement of regional soil salinization.

**Key words:** distribution of the water and salt; salinization irrigation district; grey relational analysis; Kriging interpolation; Hetao Irrigation District

非饱和-饱和带的水与盐是干旱区农田生态安全的两大重要生态因子,探求田间尺度下非饱和带水盐(0~120 cm 土层的含水量、含盐量)与饱和带水、盐(地下水埋深、矿化度)的空间分布规律,研究影响土壤盐渍化的各因子相互关联度,可为区域种植结构、灌溉制度和盐渍化防治措施的合理制定提供理论依据。目前,针对土壤水盐空间变异性的研究较多<sup>[1-8]</sup>,相关研究多集中在土壤水盐空间分布方面,对区域内土壤水盐和地下水、盐时空变异的研究较少。灰色系统理论<sup>[9]</sup>作为新兴学科,已在农业<sup>[10]</sup>、水文<sup>[11]</sup>、水利<sup>[12]</sup>等领域得到广泛应用,但对土壤与地下水盐的灰色关联研究<sup>[13]</sup>目前还较少涉及。

本研究针对作物生育期及前后时间段土壤水盐的复杂动态变化,在前人研究的基础上,运用地质统计学方法对内蒙古河套灌区隆胜试验示范区的土壤水盐(非饱和带)、地下水埋深与矿化度(饱和带)在不同阶段的空间分布进行研究,利用灰色系统理论分析了不同地下水埋深条件下土壤水盐因子的灰色关联度,并对各因子进行综合排序,以期为河套灌区农田生态环境可持续发展和土壤盐碱化防治提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

隆胜试验示范区位于内蒙古河套灌区中部永济灌域(临河市隆胜乡),地处北纬 40°49′~40°54′,东经 107°27′~107°32′。研究区南北长约 10.5 km,东西宽约 3.8 km,总控制面积约 2 800 hm<sup>2</sup>(图 1)。研究区属于温带大陆性干旱、半干旱气候带,年平均气温 6.9 ℃,多年平均降水量 165 mm,年平均蒸发量为 2 237 mm,多年平均地下水埋深为 1.77 m,年平均地下水矿化度为 1.74 g/L。如图 1 所示,在隆胜试验示范区内共布设 17 个观测点,观测点平面控制采用手持式 GPS 定位,高程控制采用水准仪测定,观测点基本均匀覆盖整个试验区。

### 1.2 数据来源

研究区内种植的主要作物为玉米,每年 4 月下旬播种,9 月下旬收割。本研究采用 2013 年的观测数据进行分析,将分析时段分为播种前、生育期和收割后 3 个时间段,其时间段划分分别为 03-20—04-20、04-21—09-20 和 09-21—11-20。

1) 采样方案。取土深度为 0~120 cm,平均分为 6 层。自第 1 次灌水开始前(04-20 左右),土壤剖

面每 10 d 观测 1 次(冻融期间停测),灌水前和灌水后以及雨后加测 1 次。测定项目包括土壤含水量、含盐量、地下水埋深和地下水矿化度。地下水埋深每 5 d 观测 1 次(冬季改为每 10 d 观测 1 次),地下水

矿化度每 10 d 观测 1 次,雨后和灌水后均加测 1 次。

2)测定方法。土壤含水量采用烘干法测定,土壤含盐量采用烘干称质量法测定,地下水埋深采用绳测法人工测定,地下水矿化度采用质量法测定。

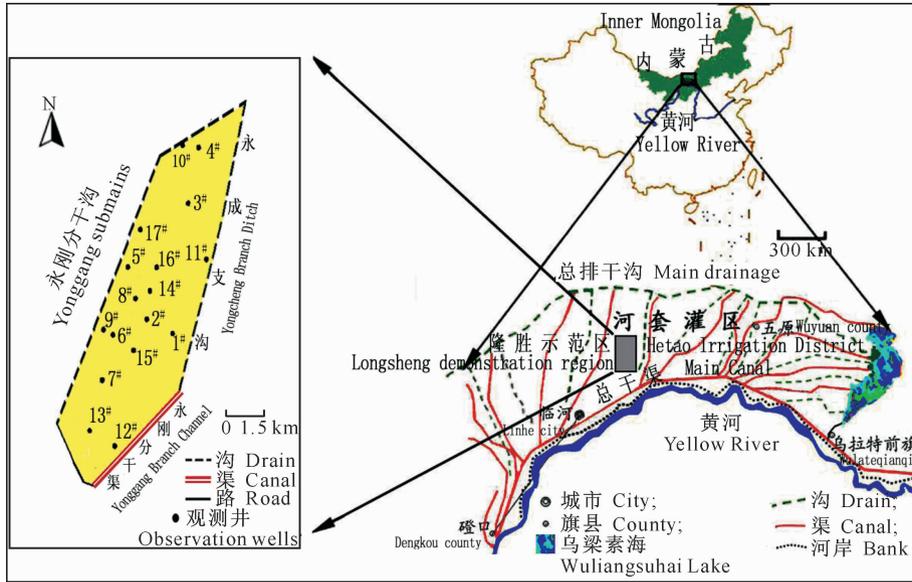


图 1 河套灌区隆胜试验示范区的相对位置示意图  
Fig. 1 Relative position of Longsheng test in Hetao Irrigation District

### 1.3 分析方法

灰色关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种方法<sup>[9]</sup>。针对土壤中各因素周期性变化的灰色关联分析以“小样本”、“贫信息”的特点而优于其他分析方法。灰色关联分析的基本原理是根据各比较数列集构成的曲线族与参考数列构成的曲线之间的几何相似程度,来确定比较数列集与参考数列构成曲线的几何相似程度,其形状越相似,则其关联程度越大。

设参考数列为  $Y_0(k)$ , 比较数列为  $Y_i(k)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , 序列长度为  $N$ , 采用灰色关联分析研究  $Y_i(k)$  与  $Y_0(k)$  的密切程度, 即求  $Y_i(k)$  与  $Y_0(k)$  序列的相关度。为保证灰色关联分析结果的正确性, 首先对原数据变换进行无量纲化处理。本研究采用标准化变换, 即先分别求出各个序列的平均值和标准差, 再将各个原始数据减去平均值后再除以标准差, 得到的新数据序列  $x_i(k)$  与  $x_0(k)$  即为标准化序列, 量纲为 1, 其均值为 0, 方差为 1。经数据变换后, 计算各点之间的关联系数, 点关联系数的定义为:

$$\xi_i(k) = r[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_{i \in m} \min_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中:  $\xi_i(k)$  为第  $k$  时刻比较曲线  $x_i$  对参考曲线  $x_0$  的相对差值, 这种形式的相对差值称为  $k$  时刻  $x_i$  对  $x_0$  的关联系数;  $\rho$  为分辨系数, 其意义为削弱最大绝对差数值太大引起的失真, 提高关联系数之间的差异显著性,  $\rho$  越小, 分辨力越大,  $\rho$  一般的取值区间为  $(0, 1)$ , 本研究中分辨系数  $\rho$  取 0.5。

$r_i$  代替  $r_{0i}$ , 则有:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

### 1.4 统计特征参数

1.4.1 变异系数 样本的标准差对平均值的百分数为样本的变异系数(CV),  $CV < 0.1$  为弱变异性,  $0.1 \leq CV < 1$  为中等变异性,  $CV \geq 1$  为强变异性。

1.4.2 偏度系数 偏度系数(Skewness)衡量实数随机变量概率分布的不对称性, 是无量纲的量。若数据呈正态分布则偏度系数为 0, 其绝对值越大, 表明偏斜程度越大。

通过 2 个比较序列的关联系数计算关联度, 关联度  $r_{0i}$  的计算公式为:

$$r_{0i} = r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r[x_0(k), x_i(k)] \quad (2)$$

若将  $r[x_0(k), x_i(k)]$  用关联系数  $\zeta_i(k)$  代替, 用

1.4.3 峰度系数 峰度系数(Kurtosis)表征概率密度分布曲线在平均值处峰值高低的特征数,是无量纲的量。数据呈正态分布时,峰度系数值为0;当数据大多集中于平均值附近时,形成高窄尖峭峰,总体峰度系数大于0;当数据较为分散,形成平坦宽阔峰时,总体峰度系数小于0。

## 2 结果与分析

### 2.1 水盐信息的统计特征

按经典统计学方法<sup>[14]</sup>分析,得到内蒙古河套灌

区隆胜试验示范区土壤的经典统计参数见表1~4。由表1可知,研究区土壤含水量实测值变异系数均为0.2~0.3,呈中度偏弱变异性,0~40与40~120 cm土层含水量的变异系数差异不大;偏度系数、峰度系数均接近于0,数据基本满足正态分布。

表2显示,研究区0~40 cm土层土壤含盐量的变异系数明显高于40~120 cm土层,0~40 cm土层含盐量的变异系数为0.6~0.9,呈中度偏强变异性;0~40 cm土层的偏度系数和峰度系数较大程度偏离了0,经对数变换后,接近正态分布。

表 1 河套灌区隆胜试验示范区土壤含水量观测值的统计结果

Table 1 Statistics and analysis of soil moisture observations of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

土层深度/cm Soil layer depth	测定时段 Determination period	样本数 Sample size	均值/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Mean	极差/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Extreme deviation	方差 Variance	标准误 Standard error	变异系数 Coefficient of variation	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
0~40	播种前 Before sow	60	195.95	260.44	3 143.88	7.24	0.29	0.72	0.71
	生育期 Growth period	60	216.38	265.09	2 142.17	5.98	0.21	-0.84	2.11
	收割后 Harvest	60	225.78	253.98	4 286.03	8.45	0.28	-0.17	-0.79
40~120	播种前 Before sow	60	253.05	209.00	3 351.58	7.47	0.24	-0.03	-0.94
	生育期 Growth period	60	241.66	231.54	2 578.07	6.56	0.20	0.04	-0.68
	收割后 Harvest	60	249.68	291.28	4 763.46	8.91	0.28	-0.13	-0.85

表 2 河套灌区隆胜试验示范区土壤含盐量观测值的统计结果

Table 2 Statistics and analysis of soil salinity observations of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

土层深度/cm Soil layer depth	测定时段 Determination period	样本数 Sample size	均值/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Mean	极差/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Extreme deviation	方差 Variance	标准误 Standard error	变异系数 Coefficient of variation	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
0~40	播种前 Before sow	60	1.90	9.27	2.00	0.18	0.74	3.96	20.26
	生育期 Growth period	60	1.76	7.45	1.30	0.15	0.66	3.14	13.34
	收割后 Harvest	60	1.38	9.05	1.43	0.15	0.89	5.56	37.06
40~120	播种前 Before sow	60	1.52	3.13	0.53	0.09	0.48	0.90	0.24
	生育期 Growth period	60	1.82	4.98	1.09	0.13	0.57	1.43	2.07
	收割后 Harvest	60	1.55	4.39	0.75	0.11	0.56	1.76	4.33

表 3 河套灌区隆胜试验示范区地下水埋深观测值的统计结果

Table 3 Statistics and analysis of groundwater depth observations of Longsheng

demonstration area in Hetao Irrigation District

测定时段 Determination of the period	样本数 Sample size	均值/m Mean	极差/m Extreme deviation	方差 Variance	标准误 Standard error	变异系数 Coefficient of variation	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
播种前 Before sow	60	2.23	1.42	0.11	0.04	0.15	-0.52	-0.49
生育期 Growth period	60	1.47	1.99	0.21	0.06	0.31	0.26	-0.04
收割后 Harvest	60	0.78	2.16	0.36	0.08	0.65	0.65	-0.62

表 4 河套灌区隆胜试验示范区地下水矿化度观测值的统计结果

Table 4 Statistics and analysis of groundwater salinity observations of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

测定时段 Determination of the period	样本数 Sample size	均值/ (g·L <sup>-1</sup> ) Mean	极差/(g·L <sup>-1</sup> ) Extreme deviation	方差 Variance	标准误 Standard error	变异系数 Coefficient of variation	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
播种前 Before sow	40	1.82	4.62	0.94	0.15	0.53	1.56	3.22
生育期 Growth period	40	1.81	4.29	1.17	0.17	0.60	1.37	1.16
收割后 Harvest	40	1.75	5.68	1.67	0.21	0.74	1.98	3.91

表3和表4表明,研究区地下水埋深在播种前和生育期呈中度偏弱变异性,而在收割后变异性增

大,从偏度系数、峰度系数来看,数据基本满足正态分布;地下水矿化度在生育期及其前后均呈中度偏

强变异性,从偏度系数、峰度系数来看,数据基本满足正态分布。

总体来看,非饱和带与饱和带中盐分的空间变异程度均大于水分,非饱和带-饱和带水盐的变异程度由高到底的顺序依次为土壤含盐量>地下水矿化度>地下水埋深>土壤含水量。

### 2.2 水盐信息的时空变异

基于 2.1 节的经典统计分析,可知河套灌区表

层(0~40 cm)土壤水盐观测值的空间变异性较大,能更好地反映灌区土壤盐分空间分布差异,故在水盐信息的时空变异分析中采用 0~40 cm 土层的观测数据。利用普通克里格法<sup>[15-16]</sup>,分别对研究区表层土壤的含水量、含盐量及地下水埋深、矿化度进行空间插值,得到内蒙古河套灌区 0~40 cm 土层土壤含水量、含盐量及地下水埋深、矿化度插值后的空间分布如图 2~5 所示。

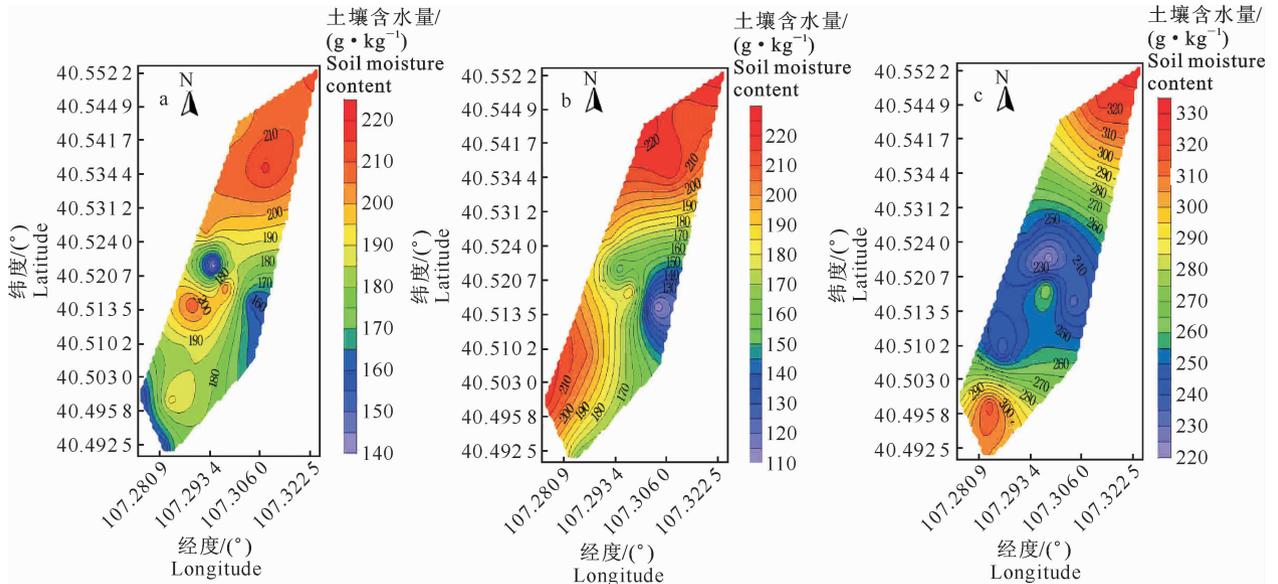


图 2 河套灌区隆胜试验示范区 0~40 cm 土层土壤含水量的空间分布

a. 播种前;b. 生育期;c. 收割后

Fig. 2 Spatial distribution of soil moisture content among 0—40 cm soil layer of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

a. Before sow;b. Growth period;c. Harvest

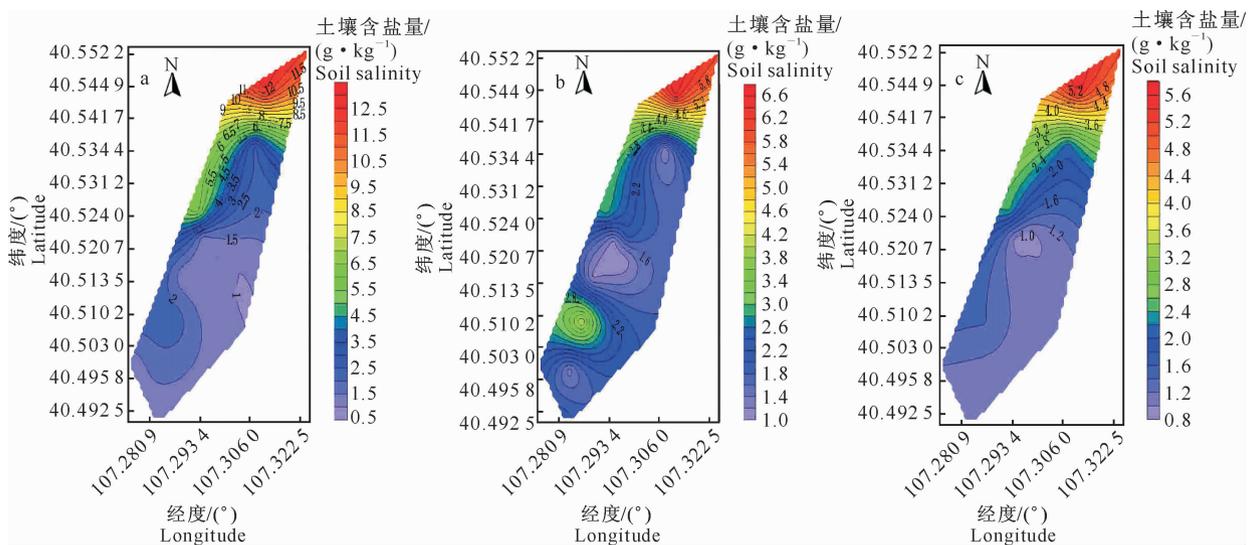


图 3 河套灌区隆胜试验示范区 0~40 cm 土层土壤含盐量的空间分布

a. 播种前;b. 生育期;c. 收割后

Fig. 3 Spatial distribution of soil salinity among 0—40 cm soil layer of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

a. Before sow;b. Growth period;c. Harvest

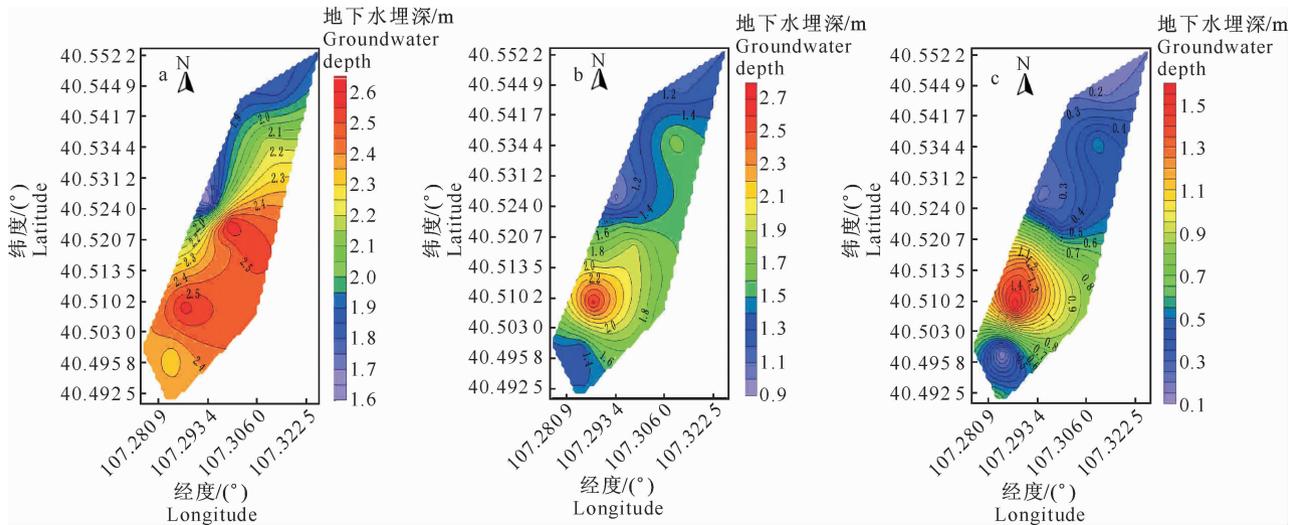


图 4 河套灌区隆胜试验示范区地下水埋深的空间分布

a. 播种前; b. 生育期; c. 收割后

Fig. 4 Spatial distribution of groundwater depth of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

a. Before sow; b. Growth period; c. Harvest

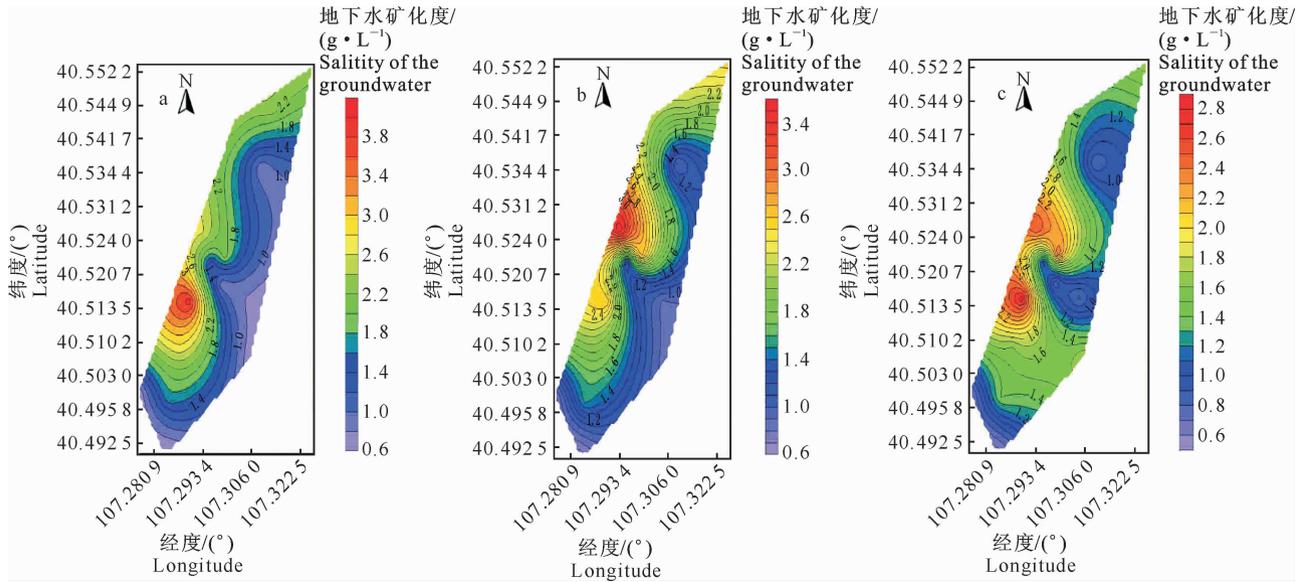


图 5 河套灌区隆胜试验示范区地下水矿化度的空间分布

a. 播种前; b. 生育期; c. 收割后

Fig. 5 Spatial distribution of salinity of the groundwater of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

a. Before sow; b. Growth period; c. Harvest

图 2 表明,播种前研究区中部表层土壤含水量 ( $160 \sim 200 \text{ g/kg}$ ) 明显低于北部 ( $190 \sim 220 \text{ g/kg}$ ) 与南部 ( $180 \sim 200 \text{ g/kg}$ ); 生育期北部表层土壤含水量 ( $180 \sim 220 \text{ g/kg}$ ) 依旧高于中南部 ( $120 \sim 200 \text{ g/kg}$ ); 收割后中南部表层土壤含水量 ( $210 \sim 250 \text{ g/kg}$ ) 较低。总体来看,播种前、生育期、收割后表层土壤含水量由北至南呈降低趋势,研究区中部 8# 观测点表层土壤含水量呈现漏斗形状,其南部、北部地带土壤含水量均较高。由于播种前降雨稀少且无灌

溉,生育期有灌溉和耗水,水分波动变化较大,在收割后按河套灌区灌水习惯有 1 次秋季灌溉,所以从时间上来看,研究区表层土壤含水量表现为收割后 > 生育期 > 播种前 (表 1、图 2)。

图 3 显示,播种前研究区北部表层土壤含盐量 ( $6 \sim 13 \text{ g/kg}$ ) 明显高于中南部 ( $1 \sim 5 \text{ g/kg}$ ); 生育期表层土壤含盐量整体降低,但依旧呈北高 ( $4 \sim 6.6 \text{ g/kg}$ ) 南低 ( $1 \sim 4 \text{ g/kg}$ ) 趋势; 收割后表层土壤含盐量的空间分布除南部差异变小外,此时北部表层土

壤含盐量与生育期基本相同。研究区表层土壤含盐量分布呈现较明显的北高南低趋势,研究区中部表层土壤含盐量略低于南北两侧,北部表层土壤 EC 值为 3~14 g/kg,南部表层土壤 EC 值为 1~5 g/kg。在播种前由于土壤返盐作用土壤盐分值较高,作物生育期虽有几次灌水,但是由于作物根系吸水,土壤中盐分随水分又返回地表,此时期土壤盐分变化复杂,收割后进行秋灌的主要目的是灌水洗盐,此时期表层土壤的含盐量开始下降,故研究区不同时期表层土壤的含盐量由高到低依次为播种前>生育期>收割后(表 2、图 3)。

图 4 表明,地下水埋深在播种前呈现出北浅南深的空间分布趋势,南北地下水埋深之差最大为 0.7 m;作物生育期地下水埋深空间分布趋势与播种前大致相同,并在南部出现“地下漏斗”,最深处地下水埋深达 2.6 m;在收割后研究区北部地下水埋深升高至 0.2 m,南区“地下漏斗”处地下水埋深升高至 1.3 m。在空间上,地下水埋深由北至南呈由浅及深的空间格局;在时间上,则播种前一生育期一收割后地下水埋深呈下降趋势。地下水埋深呈北浅南深趋势,这可能是由于研究区地势为北低南高走向;另外,在研究区南部出现“地下漏斗”处为井灌区,此区域由于多年抽取地下水致地下水埋深逐年

下降,这可能也是研究区南部地下水埋深低的另一关键因素。

从图 5 可以看出,研究区地下水矿化度的空间分布在 3 个时期由西北向东南均呈“退潮”状,从时间上来看研究区整体地下水矿化度表现为播种前>生育期>收割后。研究区地下水矿化度属弱咸水范围。研究区边界条件为北侧、西侧和东侧三面环沟(排水沟),南侧偏东边界靠渠,由于特殊的边界条件和地势条件,导致研究区地下水矿化度西北高东南低。

综上可知,研究区北部地下水埋深浅,地下水矿化度程度高,地表盐渍化较严重,土壤含水量大;研究区南部地下水埋深较深,地下水矿化度程度高,但地表无盐渍化,土壤含水量相对适宜。说明在地下水矿化度相同的情况下,地下水埋深是影响土壤盐渍化的关键因素。

### 2.3 水盐动态的灰色关联分析

基于研究区水盐时空变异的分析结论,取研究区内地下水埋深年均值分别为 1.5、2.0、2.5 m 的 3 个观测点的数据,分别进行灰色关联分析。利用公式(1)~(3)依次将土壤含水量、土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度数据作为母序列,其余为子序列,计算关联度并对因子进行排序,结果如表 5 所示。

表 5 河套灌区隆胜试验示范区不同地下水埋深年均值下各土壤因素间的关联度

Table 5 Correlation among soil factor with annual average of different groundwater depths of Longsheng demonstration area in Hetao Irrigation District

地下水埋深/m Groundwater depth	关联矩阵 Association matrix	地下水埋深 Groundwater depth	地下水矿化度 Salinity of groundwater	土壤含水量 Soil moisture content	土壤含盐量 Soil salinity
1.5	地下水埋深 Groundwater depth	1	0.698 0	0.726 1	0.683 2
	地下水矿化度 Salinity of groundwater	0.643 2	1	0.578 6	0.600 4
	土壤含水量 Soil moisture content	0.724 0	0.635 3	1	0.674 2
	土壤含盐量 Soil salinity	0.683 2	0.652 9	0.672 0	1
2.0	地下水埋深 Groundwater depth	1	0.620 7	0.625 4	0.644 3
	地下水矿化度 Salinity of groundwater	0.609 5	1	0.492 8	0.519 3
	土壤含水量 Soil moisture content	0.625 4	0.505 4	1	0.672 0
	土壤含盐量 Soil salinity	0.638 2	0.525 1	0.666 2	1
2.5	地下水埋深 Groundwater depth	1	0.643 2	0.572 0	0.564 6
	地下水矿化度 Salinity of groundwater	0.679 0	1	0.637 8	0.501 1
	土壤含水量 Soil moisture content	0.534 9	0.568 6	1	0.631 7
	土壤含盐量 Soil salinity	0.603 7	0.501 1	0.702 1	1

表 5 表明,在地下水埋深年均值为 1.5 m 时各因子对地下水埋深的关联序为:  $r_{\text{土壤含水量}} > r_{\text{地下水矿化度}} > r_{\text{土壤含盐量}}$ ,对地下水矿化度的关联序为:  $r_{\text{地下水埋深}} > r_{\text{土壤含盐量}} > r_{\text{土壤含水量}}$ ,对土壤含水量的关联序为:  $r_{\text{地下水埋深}} > r_{\text{土壤含盐量}} > r_{\text{地下水矿化度}}$ ,对土壤含盐量的关联序为:  $r_{\text{地下水埋深}} > r_{\text{土壤含水量}} > r_{\text{地下水矿化度}}$ 。

条件下,对地下水埋深关联度最大的因子为土壤含盐量,对地下水矿化度关联度最大的因子为地下水埋深,对土壤含水量关联度最大的因子为土壤含盐量,对土壤含盐量关联度最大的因子为土壤含水量。当地下水埋深年均值为 2.5 m 时,地下水埋深与地下水矿化度、土壤含盐量与土壤含水量互为关联度最大的因子。

由表 5 还可知,在地下水埋深年均值为 2.0 m

由上述分析可知,地下水埋深条件不同则土壤中水盐各因子的关联度也不同,在浅地下水埋深条件下(年均值为 1.5 m),非饱和带土壤水盐与饱和带土壤水盐关联度交互密切,地下水矿化度与土壤含盐量存在显著的交互作用,说明当年内地下水埋深均值为 1.5 m 时,土壤含盐量的主要影响因子为地下水矿化度。在地下水埋深年均值为 2.5 m 条件下,土壤非饱和带和饱和带中的水与盐之间互为主关联因子,说明在深地下水埋深条件下土壤水盐与地下水盐关联较小,土壤中盐分与地下水中可溶性盐基本上不进行交互作用。在地下水埋深年均值为 2.0 m 条件下,土壤含水量、土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度之间基本形成“循环型”关联关系,各因素之间相互制约。

### 3 结论与讨论

1)内蒙古河套灌区隆胜试验示范区 80% 区域面积的地下水属弱咸水,矿化度程度相对较高,地下水埋深呈北浅南深趋势,研究区北部地表盐渍化较严重,南部基本上无盐渍化现象,说明相同矿化度条件下,较浅的地下水埋深是导致土壤盐渍化的直接原因。

2)由不同埋深条件下水盐关联度的分析得知,当地下水埋深条件为 2.0 m 时,研究区土壤含水量、土壤含盐量、地下水埋深和地下水矿化度的灰色关联度达到相对平衡状态。

3)综合以上研究结果,建议将研究区北部边界排水沟加深 1.0 m,以利于排水排盐,使研究区北部地下水埋深降至 2.0 m 左右,以利于土壤中的盐分侧向排出。研究区南北部地下水埋深及土壤条件不同,建议研究区根据作物对土壤水分与盐分的需求及地下水埋深条件,定量确定南北区各自的灌水决策,使水资源得到合理利用的同时又能防止土壤发生次生盐碱化。

#### [参考文献]

[1] Sylla M, Stein A, Van Breemen N. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agro-ecosystem in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1995, 54(1): 1-15.

[2] Cetin M, Kirda C. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1/2/3/4): 238-249.

[3] 张克新,刘普幸,霍华丽,等.敦煌绿洲天然胡杨林下土壤水盐空间变化特征研究 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 563-570.

Zhang K X, Liu P X, Huo H L, et al. The spatial variations of soil water and saline content under populus euphratica in dunhuang oasis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 563-570. (in Chinese)

[4] 姚荣江,杨劲松,刘广明.黄河三角洲地区典型地块地下水特征的空间变异性研究 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1071-1075.

Yao R J, Yang J S, Liu G M. Spatial variability of groundwater properties in some typical areas of the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1071-1075. (in Chinese)

[5] 姚荣江,杨劲松,韩建均.海涂围垦区土壤盐分空间变异模拟的比较研究 [J]. *土壤学报*, 2012, 49(2): 275-281.

Yao R J, Yang J S, Han J J. Comparative study of simulations of spatial variability of soil salinity in coastal polders [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2): 275-281. (in Chinese)

[6] 阮本清,许凤冉,蒋任飞.基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析 [J]. *水利学报*, 2008, 39(5): 573-578.

Ruan B Q, Xu F R, Jiang R F. Analysis on spatial and temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 573-578. (in Chinese)

[7] 王玉刚,肖笃宁,李彦.流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性 [J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5262-5270.

Wang Y G, Xiao D N, Li Y. Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5262-5270. (in Chinese)

[8] 杜军,杨培岭,李云开,等.河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 26-31.

Du J, Yang P L, Li Y K, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 26-31. (in Chinese)

[9] 袁嘉祖.灰色系统理论及其应用 [M].北京:科学出版社, 1991.

Yuan J Z. Grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)

[10] 于国强,李占斌,张震,等.洛惠渠灌区地下水位动态模拟研究 [J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2009, 37(12): 223-228.

Yu G Q, Li Z B, Zhang X, et al. Simulation study on groundwater level dynamic in Luohuiqu Irrigation District [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2009, 37(12): 223-228. (in Chinese)

[11] 张倩,沈利,蔡焕杰,等.基于灰色理论和回归分析的需水量组合预测研究 [J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2010, 38(8): 223-227.

Zhang Q, Shen L, Cai H J, et al. Combination forecast research on water demand based on the grey theory and regression analysis [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2010, 38(8): 223-227. (in Chinese)

[12] 景亚平,张鑫,罗艳.基于灰色神经网络与马尔科夫链的

- 城市需水量组合预测 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(7):229-234.
- Jing Y P, Zhang X, Luo Y. Forecasting of urban water demand based on combining Grey and BP neural network with Markov chain model [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2011, 39(7): 229-234. (in Chinese)
- [13] 于国强,李占斌,张霞,等. 土壤水盐动态的 BP 神经网络模型及灰色关联分析 [J]. 农业工程学报,2009,25(11):74-79.
- Yu G Q, Li Z B, Zhang X, et al. Dynamic simulation of soil water-salt using BP neural network model and grey correlation analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 74-79. (in Chinese)
- [14] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M]. 北京:科学出版社,2002.
- Tang Q Y, Feng M G. Practical statistical analysis and DPS data processing system [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [15] 侯景儒,黄竞先. 地质统计学的理论与方法 [M]. 北京:地质出版社,1989.
- Hou J R, Huang J X. The theory and method of geostatistics [M]. Beijing: Geology Press, 1989. (in Chinese)
- [16] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京:科学出版社,2005.
- Zhang R D. Theory and application of spatial variation [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

(上接第 164 页)

- [15] 李育农. 苹果属植物种质资源研究 [M]. 北京:中国农业出版社,2001:3-145.
- Li Y N. Study on *Malus* germplasm resources [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001: 3-145. (in Chinese)
- [16] 郭亦博,李厚华,张延龙,等. 秦巴山区苹果属海棠资源调查分析 [J]. 北方园艺,2013(13):41-44.
- Guo Y B, Li H H, Zhang Y L, et al. Investigation and analysis of crabapple germplasm resources of *Malus* in Qinba Mountains area [J]. Northern Horticulture, 2013(13): 41-44. (in Chinese)
- [17] Rehder A. Manual of cultivated trees and shrubs [M]. New York: Macmillan Co, 1940: 389-399.
- [18] Langenfelds V. Apple tree systematics [M]. Rijia: Zinatne, 1991: 119-195.
- [19] Huckins C A. A revision of the sections of the genus *Malus* Miller [J]. Diss Abstr Int, 1972, 33(3): 1031.