

盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算

窦旭^{1,2} 史海滨^{1,2} 李瑞平^{1,2} 苗庆丰^{1,2} 田峰^{1,2} 于丹丹^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对盐渍化灌区土壤盐渍化问题,以内蒙古河套灌区下游乌拉特灌域为研究区,通过野外实测与室内试验分析结合,采用冗余分析法探讨了盐渍化改良耕地与荒地春季(4月)和秋季(10月)根层土壤(0~20 cm, 20~40 cm)盐分离离子与全盐、pH值、养分之间的相关关系,明确了其变化特征与数量关系,并估算了试验区改良耕地和荒地间1 m土体的盐分迁移量。结果表明,改良耕地与荒地土壤阴离子均以Cl⁻为主,分别占阴离子总量的45.27%、58.78%,阳离子以Na⁺为主,分别占阳离子总量的60.67%、53.94%。荒地平均全盐含量超过7.0 g/kg,土壤盐渍化程度较重。冗余分析表明,改良耕地土壤全盐含量起主导作用的是SO₄²⁻、Cl⁻、Ca²⁺,荒地土壤全盐含量起主导作用的是Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺。土壤pH值变化与HCO₃⁻有着密切的关系。改良耕地有效磷与Na⁺呈显著负相关($P < 0.05$),荒地速效钾与K⁺呈显著正相关($P < 0.05$),有效磷与Na⁺显著负相关($P < 0.05$);在前2个排序轴中,改良耕地研究对象与环境关系的变量累积百分比分别为71.38%、71.65%,荒地研究对象与环境关系的变量累积百分比分别为89.02%、89.16%,反映出改良耕地与荒地各自的研究对象与环境变量之间的线性关系。改良耕地中Na⁺对全盐、pH值、土壤养分的影响最大,其次是Ca²⁺;荒地中Na⁺对全盐、pH值、土壤养分的影响最大,其次是K⁺。在作物一个生育周期内,荒地1 m土体中积盐量939 842 kg/hm²。地下水补给将盐分带到土壤中,占盐分积累量的70.06%,灌溉期改良耕地地下水迁移给荒地的盐分集中在60~100 cm土体中,占积盐量的22.83%,改良耕地水平渗透给荒地的盐量占积盐量7.11%。

关键词: 盐渍化灌区; 盐分离离子; 养分; 盐分迁移; 相关关系; 冗余分析

中图分类号: S287 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0279-12

OSID:



Distribution Characteristics of Salinity and Nutrients in Salinized Soil Profile and Estimation of Salt Migration

DOU Xu^{1,2} SHI Haibin^{1,2} LI Ruiping^{1,2} MIAO Qingfeng^{1,2} TIAN Feng^{1,2} YU Dandan^{1,2}
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010018, China)

Abstract: Aiming at the problem of soil salinization in salinized irrigation areas, taking Wulate Irrigation Area in the lower reaches of the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia as the research area, through the combination of field test and indoor test analysis, the redundancy analysis method was used to explore the correlation between salt segregation elements and total salt, pH value, and nutrients in the root layer soil (0~20 cm, 20~40 cm) in spring and autumn on the salinized improved cultivated land and wasteland, and its change characteristics and quantitative relationship were clarified, and the salt migration of 1m soil between the improved cultivated land and the wasteland in the experimental area was estimated. The results showed that the anions of the improved farmland and wasteland soil were mainly Cl⁻, accounting for 45.27% and 58.78% of the total anions, respectively, and the cations were mainly Na⁺, accounting for 60.67% and 53.94% of the total cations respectively. The total salt content of wasteland exceeded 7.0 g/kg on average, and the degree of soil salinization was relatively serious. Redundancy analysis

收稿日期: 2020-12-30 修回日期: 2021-02-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51879132、51769024)、内蒙古科技重大专项(zdxx2018059)和内蒙古水利科技重大专项(nsk2018-M5)
作者简介: 窦旭(1994—),男,博士生,主要从事灌溉排水理论与新技术研究, E-mail: 1161927928@qq.com
通信作者: 史海滨(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

showed that SO_4^{2-} , Cl^- and Ca^{2+} played the leading role in improving the total salt content of cultivated soil, and Cl^- , Mg^{2+} and Na^+ played the leading role in the total salt content of wasteland soil. The change of soil pH value was mainly related to HCO_3^- . Improved cultivated land had a significant negative correlation between available phosphorus and Na^+ ($P < 0.05$), wasteland available potassium had a significant positive correlation with K^+ ($P < 0.05$), and available phosphorus had a significant negative correlation with Na^+ ($P < 0.05$). In the first two ranking axes, the cumulative proportion of changes in the relationship between the cultivated land research object and the environment was 71.38% and 71.65%, respectively. The cumulative proportions of changes in the relationship between wasteland research objects and the environment were 89.02% and 89.16%, respectively, reflecting the linear relationship between the research objects and environmental variables of the improved cultivated land and wasteland. In cultivated land, Na^+ had the most important impact on total salt, pH value, and soil nutrients, followed by Ca^{2+} ; in wasteland, Na^+ had the most important impact on total salt, pH value, and soil nutrients, followed by K^+ . In one growth cycle of crops, the amount of salt accumulated in 1 m of wasteland soil was 939 842 kg/hm². Groundwater replenishment brought salt into the soil, accounting for 70.06% of the salt accumulation. The salt transferred from the cultivated land groundwater to the wasteland during the irrigation period was concentrated in the 60 ~ 100 cm soil and accounted for 22.83% of the salt accumulation. The amount of salt that the cultivated land penetrated into the wasteland was 7.11% of the salt accumulation.

Key words: salinized irrigation district; salt ions; nutrient; salt migration; relationship; redundancy analysis

0 引言

土壤是农业生产的基础,是影响作物产量和品质的关键因子^[1],世界上约有 1/3 的土壤发生盐渍化,严重影响着农业可持续发展^[2-3],土壤盐渍化已经成为当今社会土地的突出问题之一^[4-6]。内蒙古河套灌区土壤盐渍化面积约 33.33 万 hm²,占总耕地面积的 63.8%,还有继续蔓延的趋势。土壤中盐分和养分是影响土壤质量的重要指标,其含量变化不仅直接影响植物生长,又是为微生物提供营养的基质^[7-8]。土壤盐渍化的发生受区域性因素的影响和制约,其盐分组成及离子比例呈现地域性特点,积盐和脱盐过程也存在差异,对植物和作物生长发育的影响也不尽相同^[9-10],盐分的迁移规律也有较大差异。同时盐分含量与作物生长的响应关系,也可间接反映盐渍化状况^[11-13];因此,了解土壤中盐分离子组成从而确定区域内土壤盐渍化类型,明确土壤离子与养分之间的关系以及耕荒地间的盐分迁移,对制定有针对性的改良措施尤为重要^[14]。

目前国内外对盐渍化土壤盐分离子与养分以及耕荒地间的土壤盐分迁移已展开了大量研究,结果表明土壤盐渍化与土壤中盐分离子有着密切关系,同时影响着养分分布^[15-18]。当前有关盐分离子与养分研究多集中在我国中南部与滨海地区^[19-22],河套灌区也有一些研究^[23-25],同时这些研究大多是采用传统的统计分析,如方差分析、因子分析、相关分析和回归分析等,并且大多只考虑了单因子对土壤性质或者养分的影响,而数量生

态学中的冗余分析(RDA)^[26]可以较好地反映研究对象与环境因子之间的相关关系,能够直观地给出多变量间的相互作用关系,弥补了常规分析方法的不足。对河套灌区耕地和荒地的盐分迁移有大量的研究,王国帅等^[27-28]研究表明,在作物生育期,地下水运移方向为耕地-荒地-海子;同时水分携带盐分进入荒地和海子,海子成为储盐区。李亮等^[29]利用HYDRUS-1D模型对荒地土壤水盐的迁移规律进行了模拟,结果表明,灌区荒地作物生育期处于积累盐分的过程,在灌溉期内,荒地附近耕地的灌溉水携带盐分,向无灌水的荒地积聚。任东阳等^[30]对河套灌区典型灌排单元灌溉水利用状况及盐分归趋进行了分析,表明农田腾发消耗总引水量的 78%,积累总引入盐分的 39%,荒地腾发消耗总引水量的 11%,承纳总引入盐分的 40%,荒地盐分积累较严重。

本文以改良耕地和荒地研究对象,采用相关性分析方法,探讨改良耕地和荒地土壤盐碱化特征与土壤盐分离子的关系,同时采用冗余分析方法(RDA)比较土壤盐分离离子含量与土壤全盐含量、pH值、土壤养分含量的相关关系,旨在揭示影响盐渍化土壤的主控盐分因子;并计算改良耕地与荒地间的盐分迁移量,为盐碱地治理和改良提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2018 年 4 月(春季)至 10 月(秋季)在乌拉特前旗盐碱地改良综合试验区进行,试验区位

于内蒙古自治区巴彦淖尔市河套灌区下游乌拉特灌域西山咀农场四分场和五分场,位于 108°37'28" ~ 108°39' 49" E、40° 44' 54" ~ 40° 45' 49" N, 海拔 1 017.97 ~ 1 019.95 m。试验区东西宽约 2.39 km,南北长约 1.7 km,总土地面积 400 hm²,如图 1 所示。其中南侧为改良耕地,种植利用面积 205 hm²,北侧荒地面积 195 hm²,试验区地处中温带大陆性气候区,气温多变,干燥多风,日照充足,光能丰富,降水少,蒸发强,无霜期较短。试验区多年平均气温 6 ~

8℃,多年平均降雨量 196 ~ 215 mm,蒸发量为 2 172.5 mm;无霜期 130 d;风速 2.5 ~ 3 m/s;最大冻土深度为 1.2 m。试验区 pH 值为 7.9 ~ 8.9。主要作物为葵花,主要灌溉方式为畦灌,年引水量为 1 137 750 m³。共布设 10 个地下水位观测井、6 处田间负压计,在荒地、改良耕地上各安放 3 个微型蒸发器来测量土壤蒸发量,其水盐运移依据水盐平衡原理(图 2)。试验区内设置田间微型气象站(HOBO-U30 型,美国 Onset 公司)自动记录气象数据(图 3)。

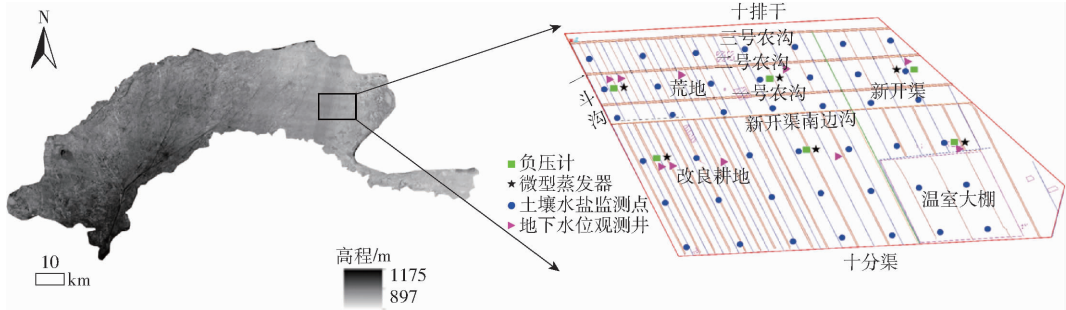


图 1 研究区和采样点分布示意图

Fig. 1 Schematic of study area and sampling point distribution

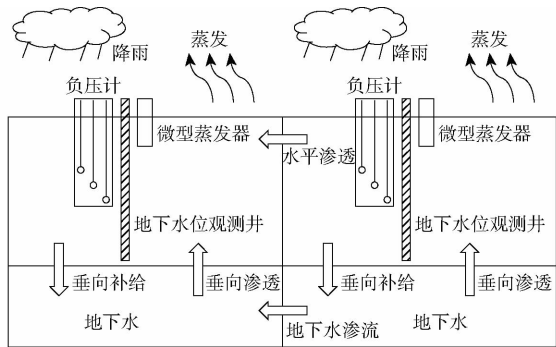


图 2 研究区试验设计剖面图

Fig. 2 Section view of experimental design in study area

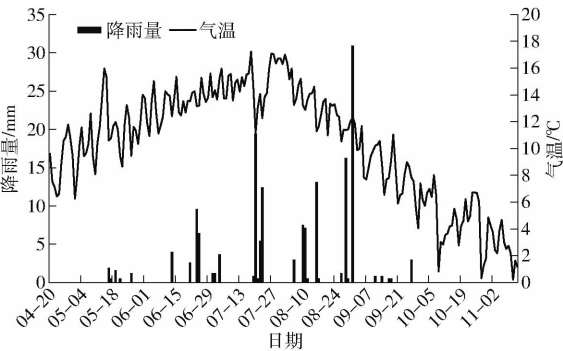


图 3 2018 年生育期降雨量和气温

Fig. 3 Rainfall and temperature during growth period in 2018

1.2 试验设计与数据采集

1.2.1 土壤基本物理性质

试验区田间布置采用 100 m × 100 m 网格,于网格节点处设采样点,共 150 个采样点,并设 9 处垂直剖面进行土壤各项指标的测试,采用土钻法采集土壤深度 1 m,共 5 层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~

60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm) 进行土壤基础数据采集与测定,试验区各层土壤物理性质如表 1 所示。

1.2.2 土壤养分

采用分光光度计与火焰光度计对土壤养分进行检测,包括全氮、有效磷、速效钾和有机质含量。春灌前和收获后各测定 1 次。采用土钻法采集土壤深度 1 m,共 5 层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm) 进行土壤养分采集与测定,试验区各层土壤养分含量如表 2 所示。

1.2.3 土壤盐分与土壤盐分离子

根据研究区土壤盐碱状况、土壤质地、盐分含量、植被长势并结合路网、沟渠分割情况确定以 300 m × 300 m 的网格布置采样点,共 42 个采样点,改良耕地和荒地各 21 个采样点,以手持全球定位系统(GPS)定位仪测定实地坐标。采用土钻采集土壤深度 1 m,共 5 层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm),带回实验室利用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定土水质量比为 1:5 的土壤浸提液电导率,每 15 d 测定 1 次,土壤盐分离子含量 K⁺ + Na⁺ 采用火焰光度计法测定, Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻ 采用 EDTA 滴定法测定, Cl⁻ 采用硝酸银滴定法测定, HCO₃⁻、CO₃²⁻ 采用双指示剂中和滴定法测定,春灌前和收获后各测定 1 次。

1.2.4 地下水埋深

改良耕地和荒地分别布设 5 眼地下水位观测井,间距分别为 50、100、500、1 000 m,荒地由西向东分别表示为 H1、H2、H3、H4、H5,改良耕地由西向东

表 1 试验区土壤物理性质

Tab.1 Soil physical properties in test area

试验区	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/(cm·s ⁻¹)	土壤类型
荒地	0~20	1.426~1.464	35.2~35.4	21.9~23.0	3.939×10 ⁻⁵	粉土
	20~40	1.468~1.472	36.0~36.5	23.8~24.2	3.798×10 ⁻⁵	粉质壤土
	40~60	1.470~1.476	34.6~35.1	24.0~24.6	1.238×10 ⁻⁵	粉土
	60~80	1.483~1.488	34.0~34.7	22.9~23.4	2.073×10 ⁻⁵	粉土
	80~100	1.485~1.490	34.8~35.3	23.9~24.1	5.176×10 ⁻⁵	粉土
改良耕地	0~20	1.451~1.458	33.1~33.6	22.0~22.4	1.918×10 ⁻⁴	粉质壤土
	20~40	1.462~1.469	33.5~34.2	23.5~23.9	4.639×10 ⁻⁵	粉质壤土
	40~60	1.463~1.470	33.2~34.0	24.0~25.0	4.753×10 ⁻⁵	粉质壤土
	60~80	1.470~1.479	34.2~34.9	23.1~23.8	1.769×10 ⁻⁵	粉质壤土
	80~100	1.480~1.483	35.0~36.0	22.0~22.3	2.800×10 ⁻⁴	粉质壤土

表 2 试验区土壤养分含量

Tab.2 Soil nutrient content in experimental area

试验区	有机质质量比/(g·kg ⁻¹)	全氮质量比/(g·kg ⁻¹)	有效磷质量比/(mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/(mg·kg ⁻¹)
改良耕地	14.18±3.32(4级)	0.94±0.19(4级)	8.30±5.98(4级)	256.54±59.08(1级)
荒地	10.21±3.27(5级)	0.54±0.25(5级)	8.34±4.45(4级)	212.06±90.05(1级)

分别为 G1、G2、G3、G4、G5。地下水埋深每隔 7 d 测定 1 次,灌溉前后每天测定 1 次,观测井为直径 110 mm 的 PVC 管,长 6 m,垂直埋入地下,埋入深度 5.7 m,埋入部分打孔及滤布包裹,人工利用铅锤测量地下水埋深。

1.2.5 土水势

改良耕地和荒地分别安装 3 组负压计,安装深度分别为 60、80、100 cm。测得改良耕地和荒地土壤各层土水势数据,分别取平均值。

1.2.6 灌溉水量和水质

用流速仪测量灌溉水量,收集灌溉水,每次取 3 次重复,利用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定水样电导率。分别于生育期 6 月 25 日灌水 105 mm,7 月 24 日灌水 90 mm,8 月 18 日灌水 90 mm。灌溉水平均矿化度为 0.67 g/L。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤含盐量计算

土壤电导率转换为土壤全盐量计算公式为^[31]

C=3.765 7EC_{1:5}-0.240 5 (1)

式中 C——土壤全盐量,g/kg

EC_{1:5}——土水质量比为 1:5 土壤浸提液电导率,dS/m

土壤含盐量计算公式为

S=1 000Cρ_sl (2)

式中 S——土壤含盐量,kg/hm²

ρ_s——土壤容重,g/cm³

l——土壤深度,cm

1.3.2 地下水补给量计算

采用定位通量法计算试验区地下水补给渗漏

量。在某一特定位置设置好定位点,然后在其上(Z₁)和下(Z₂)处安装负压计,测定土水势,计算两个界面水力梯度。结合达西定律计算出根系层下边界土壤水分通量^[32],计算式为

q=-K(h)(h₂-h₁ΔZ+1) (3)

其中 h=h₁+h₂2 (4)

K(h)=K_s(θ-θ_rθ_s-θ)^λ{1-[1-(θ-θ_rθ_s-θ)^{1m}]^m}² (5)

其中 θ=θ_r+θ_s-θ_r(1+|αh|ⁿ)ⁿ⁻¹ⁿ (6)

m=1-1/n (n>1)

式中 q——某观测时段 t 内土壤水通量,cm/d
h₁、h₂——断面 Z₁和 Z₂处的土水势,kPa
ΔZ——Z₁和 Z₂的差值,cm
K(h)——非饱和导水率,cm/d
θ——土壤体积含水率,cm³/cm³
θ_s——土壤饱和含水率,cm³/cm³
θ_r——土壤残余含水率,cm³/cm³
α、n、m、λ——经验参数
K_s——饱和导水率,cm/d
h——土壤基质势,kPa

某研究时段 T 内土体水流量 Q(T)为

Q(T)=∫₀^Tq(t)dt (7)

式中 T——作物生长周期,d

1.3.3 地下水补给盐量计算

地下水补给盐量计算公式为^[27]

$$S_b = \frac{10N_dT_{DS} \sum_{i=1}^{n'} \overline{Q}_i(z)}{\varphi} \quad (8)$$

式中 S_b ——地下水补给土壤盐量, kg/hm²
 N_d ——计算时长, d
 n' ——土壤层数
 $\overline{Q}_i(z)$ ——第 i 层土壤地下水补给量, mm/d
 T_{DS} ——地下水平均矿化度, g/L
 φ ——土壤孔隙度, 取 0.47

地下水电导率(EC)和地下水矿化度(TDS)转换公式为^[27]

$$T_{DS} = 0.69EC_w \quad (9)$$

式中 T_{DS} ——地下水矿化度, g/L
 EC_w ——地下水电导率, dS/m

1.3.4 改良耕地水平渗透盐量计算

根据盐分平衡理论, 改良耕地水平渗透给荒地盐量计算公式为^[27]

$$S_l = S_i - S_{i-1} - S_{ib} - S_d \quad (10)$$

式中 S_l ——改良耕地水平渗透给荒地盐量, kg/hm²
 S_i ——第 i 时期荒地储盐量, kg/hm²
 S_{i-1} ——第 $i-1$ 时期荒地储盐量, kg/hm²
 S_{ib} ——第 $i-1 \sim i$ 时期内地下水补给荒地的盐量, kg/hm²
 S_d ——灌溉时期荒地深层(60 ~ 100 cm)积累盐量, kg/hm²

1.3.5 土壤脱盐率计算

脱盐率是指土壤含盐量(电导率)的减小值占初始值的百分比, 计算公式为^[33-34]

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (11)$$

式中 N ——脱盐率, %
 S_1 ——灌溉前土壤含盐量, dS/m
 S_2 ——灌溉后土壤含盐量, dS/m

1.4 数据处理

采用 Excel 整理数据与制图, 利用 SPSS 17.0 软件进行相关性分析, 采用国际标准通用软件 CANOCO 5.0 进行冗余分析(RDA), 用双序图表示排序结果^[35]; Sufer 12 绘制研究区地下水 EC 图。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分离子分布特征

改良耕地与荒地不同时期盐分离子含量如图 4 (图中不同小写字母表示相同时间水平下不同土壤深度水平的离子含量之间显著差异($P < 0.05$), 不

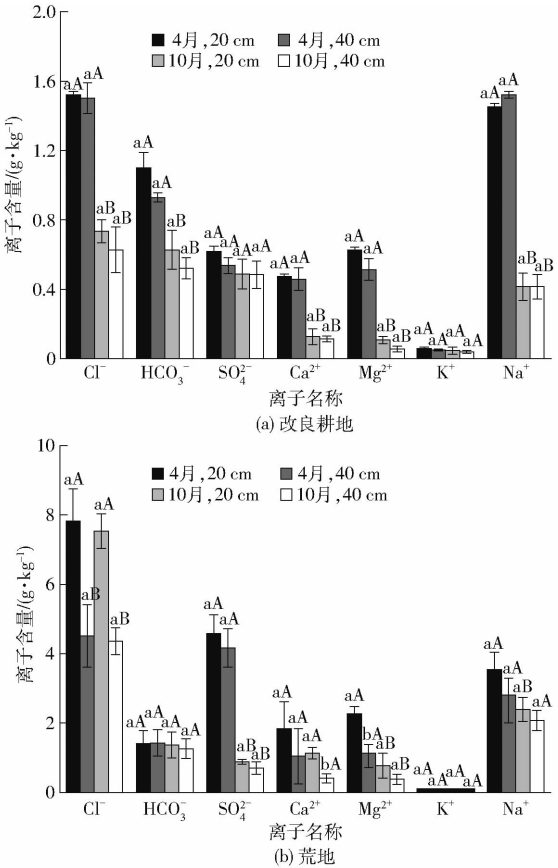


图 4 试验区土壤离子含量
Fig.4 Soil ions content in test area

同大写字母表示相同土壤深度水平下不同时间水平的离子含量之间显著差异($P < 0.05$)) 所示, 改良耕地中土壤阴离子以 Cl⁻ 为主, 占阴离子总量的 45.27%, HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 次之, 占阴离子总量的 32.88% 和 21.85%。土壤阳离子以 Na⁺ 为主, 占阳离子总量的 58.78%, 其次是 Mg²⁺ 和 Ca²⁺, 分别占阳离子总量的 20.21% 和 18.02%, K⁺ 含量最少。荒地离子含量与改良耕地趋势大致相似, 其中阴离子中 Cl⁻ 含量最高, 占阴离子总量的 60.67%, SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 次之, 占阴离子总量的 25.77% 和 13.56%。阳离子中 Na⁺ 含量最高, 占阳离子总量的 53.94%, Mg²⁺ 含量次之, 占阳离子总量的 22.59%, K⁺ 含量最少。从时间变化来看, 荒地除 Cl⁻、HCO₃⁻ 和 K⁺ 外, 其他盐分离子春季含量显著高于秋季($P < 0.05$), 其原因为荒地只受自然因素影响, 无作物生长, 只有少量耐盐碱杂草生长, 吸收离子相对较少, 且蒸发强烈导致返盐严重, 总盐分变化不大, 降低了 35.08%, 同时因为耕地灌溉的原因, 导致盐分向荒地运移, 这也是导致荒地含盐量高的原因。改良耕地由于种植葵花、玉米、小麦和牧草等作物, 吸收了土壤中部分盐分, 加上种植翻耕、作物根系作用、土壤渗透性能增加(表 1)、灌溉淋洗等人为因素

的影响,土壤中总盐分变化较大,降低了 51.9%。 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量春季均显著高于秋季 ($P < 0.05$)。

荒地中土壤盐分含量明显高于改良耕地,土壤全盐含量平均值超过 7.0 g/kg,且 0 ~ 20 cm 土层含盐量明显高于 20 ~ 40 cm 土层,属于典型的表聚型盐渍化土壤(表现为盐斑、盐霜甚至盐结皮),其原因为河套灌区夏季气温高、降水少,蒸发量较大;加之试验区荒地无灌溉淋洗,地势较低,地下水埋深较浅,在长期持续的强烈蒸发作用下,包气带毛细水上升,把深层土壤以及地下水中的可溶性盐类带到土壤表层,致使地表盐分升高,这也是导致荒地次生盐渍化的主要原因。

2.2 土壤盐分离子与全盐、pH 值、土壤养分冗余分析

为进一步明确土壤盐分离子与土壤全盐、pH 值、土壤养分之间的关系,利用 CANOCO 5.0 软件对试验区秋季根层土壤(0 ~ 40 cm)全盐、pH 值、土壤养分进行分析,首先对全盐、pH 值、养分和盐分离子的数据进行降趋对应分析(DCA),发现改良耕地中 4 个轴中梯度长度最大值为 0.25,荒地中 4 个轴中梯度长度最大值为 0.42,其值均小于 3,所以约束性分析选择冗余分析(RDA)。将土壤中的 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 作为环境因子,将土壤全盐、pH 值、全氮、有效磷、速效钾、有机质作为研究对象,绘制线性排序图进行分析,如图 5 所示,图中环境因子(土壤盐分离子)用虚线箭头表示,研究对象(土壤全盐、pH 值、土壤养分)用实线箭头表示,虚线箭头长度越长代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大;虚线箭头与实线箭头之间的夹角可以表示研究对象与环境因子之间的相关性,当夹角为锐角时,环境因子与研究对象为正相关,当夹角为钝角时,则为负相关^[35]。

如图 5 所示,改良耕地有效磷与 Mg^{2+} 存在负相关关系,速效钾与 K^+ 存在正相关关系,与 Na^+ 存在负相关关系,有机质与 Ca^{2+} 存在正相关关系,但均不显著,只有有效磷与 Na^+ 显著负相关 ($P < 0.05$);荒地中有效磷与 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 存在负相关关系,与 K^+ 存在正相关关系,速效钾与 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 存在负相关关系,有机质与 Ca^{2+} 存在正相关关系,但均不显著,只有速效钾与 K^+ 显著正相关 ($P < 0.05$),有效磷与 Na^+ 显著负相关 ($P < 0.05$)。荒地中盐分较大,离子含量较多,土壤养分含量受离子影响较大。

如表 3 所示,选取的 7 个环境因子对全盐、pH 值、土壤养分都有不同程度的影响。改良耕地土壤

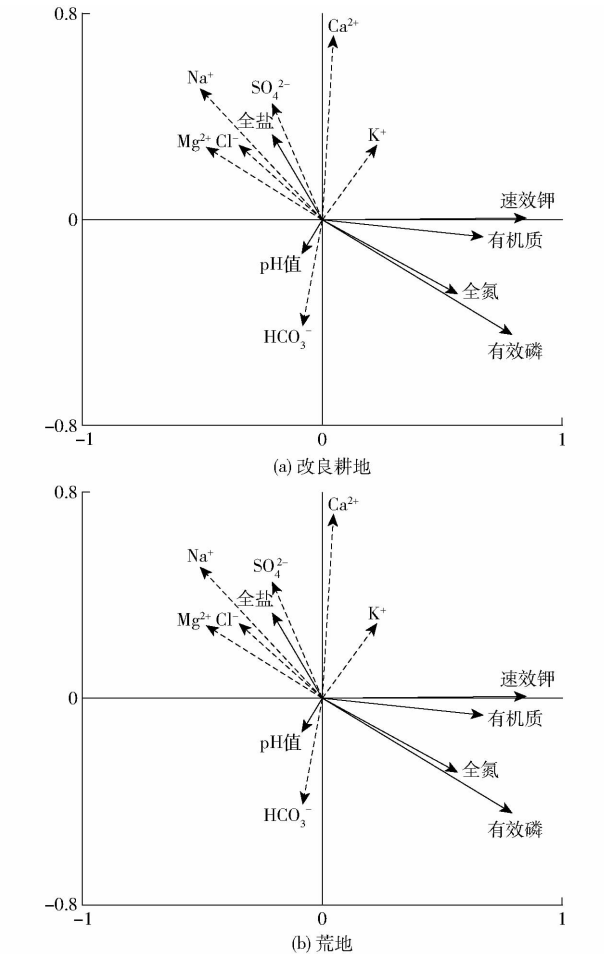


图 5 试验区 RDA 分析结果

Fig.5 RDA analysis result of test area

表 3 改良耕地与荒地 RDA 前 2 个排序轴分析结果

Tab.3 Two-axis analysis results of RDA for improved cultivated land and wasteland

环境因子	相关系数			
	改良耕地第 1 排序轴	改良耕地第 2 排序轴	荒地第 1 排序轴	荒地第 2 排序轴
Cl^-	-0.295 5	0.189 9	-0.514 0	-0.640 7
HCO_3^-	-0.069 6	-0.268 3	0.580 2	0.263 4
SO_4^{2-}	-0.178 3	0.296 6	-0.503 7	-0.270 5
Ca^{2+}	0.038 7	0.466 5	-0.417 2	-0.554 2
Mg^{2+}	-0.413 6	0.187	0.526 9	-0.681 6
K^+	0.192 2	0.191 2	0.693 2	-0.495 4
Na^+	-0.435 2	0.335 6	-0.695 4	-0.528 3
特征值	0.713 8	0.002 7	0.890 2	0.001 4
物种和环境的相关系数	0.848 3	0.660 3	0.944 5	0.831 7
变量累积百分比/%	71.38	71.65	89.02	89.16

在第 1 排序轴中,环境因子的影响程度(按绝对值大小,下同)由大到小为 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 。其中第 1 排序轴与 Na^+ 呈显著负相关关系,相关系数为 -0.435 2;在第 2 排序轴中,研究对象对环境的影响程度由大到小依次为 Ca^{2+} 、

Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} ，第 2 排序轴与 Ca^{2+} 呈极显著正相关关系，相关系数为 0.466 5。在荒地土壤中，在第 1 排序轴中，环境因子的影响程度由大到小为 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 。第 1 排序轴与 Na^+ 呈极显著负相关关系，相关系数为 -0.695 4，与 K^+ 呈极显著正相关关系，相关系数为 0.693 2；在第 2 排序轴中，研究对象对环境的影响程度由大到小为 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ，第 2 排序轴与 Mg^{2+} 呈显著负相关关系，相关系数为 -0.681 6。综合分析土壤中各盐分离子，改良耕地中 Na^+ 对全盐、pH 值、土壤养分的综合影响最为重要，其次是 Ca^{2+} ；荒地中 Na^+ 对全盐、pH 值、土壤养分的影响最为重要，其次是 K^+ 。土壤中 Na^+ 含量过多会导致土壤颗粒和团聚体分散，使土壤孔隙减少，渗透性降低，并引起植物 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的缺乏和其他营养失调^[36]，这也是影响试验区土壤全盐、pH 值、土壤养分的主要原因之一。在荒地高浓度的 Na^+ 导致 Na^+ 含量与 K^+ 含量比值增大，离子平衡失衡，极易造成植物的营养失调，并干扰 N、P、K 等营养元素的吸收，细胞代谢紊乱，导致荒地一些草类也无法生存。

试验区研究对象排序轴与环境因子相关关系如表 3 所示，改良耕地在前 2 个排序轴中，研究对象与环境的相关系数分别为 0.848 3、0.660 3，研

究对象与环境关系的变量累积百分比分别为 71.38%、71.65%。荒地在前 2 个排序轴中，物种与环境的相关系数分别为 0.944 5、0.831 7，研究对象与环境关系的变量累积百分比分别为 89.02%、89.16%。能够很好地反映出改良耕地与荒地各自的研究对象与环境变量之间的线性关系，故本文排序结果能较好地解释研究对象与环境之间的相关关系。

2.3 试验区盐分迁移量

2.3.1 试验区盐分变化

由表 4 可知，在改良耕地 1 m 土体中，从葵花播种开始到秋浇前（5 月 30 日至 10 月 20 日，共 144 d）计算，5 月 30 日葵花开始播种至 6 月 24 日，土壤积盐 41 247 kg/hm²，积盐 14.75%；灌溉期（6 月 25 日至 8 月 23 日），改良耕地盐量平均值为 278 941 kg/hm²，较灌前脱盐 13.05%；秋浇前（10 月 20 日）较灌溉期积盐量 72 124 kg/hm²，积盐 25.86%。由表 5 可知，在荒地 1 m 土体中，5 月 30 日至 6 月 24 日，返盐现象严重，土壤返盐量 348 502 kg/hm²，盐分增加 13.16%；灌溉期（5 月 25 日至 8 月 23 日），荒地盐量平均值为 3 170 113 kg/hm²，较灌前（5 月 16 日）积盐 172 886 kg/hm²，积盐 5.77%，秋浇前（10 月 20 日）较灌溉期积盐量 418 454 kg/hm²，积盐 13.20%。

表 4 不同时期改良耕地各层土壤含盐量							
Tab.4 Changes of soil salt in different layers of cultivated land in different periods							kg/hm ²
土层深度/cm	5 月 30 日	6 月 24 日	7 月 3 日	7 月 31 日	8 月 23 日	9 月 19 日	10 月 20 日
0 ~ 20	69 715	80 456	76 582	65 425	57 196	63 140	76 786
20 ~ 40	58 223	66 244	61 845	56 894	53 361	62 920	63 867
40 ~ 60	45 067	56 237	53 639	50 369	47 849	66 753	78 441
60 ~ 80	54 914	58 237	55 021	48 657	48 030	69 326	74 326
80 ~ 100	51 640	59 632	63 080	50 487	48 388	55 265	57 645
总计	279 559	320 806	310 167	271 832	254 824	317 404	351 065

表 5 不同时期荒地各层土壤含盐量							
Tab.5 Changes of soil salt in different layers of waste land in different periods							kg/hm ²
土层深度/cm	5 月 30 日	6 月 24 日	7 月 3 日	7 月 31 日	8 月 23 日	9 月 19 日	10 月 20 日
0 ~ 20	895 001	902 465	915 588	954 136	985 881	1 019 970	1 048 347
20 ~ 40	446 119	562 364	586 547	634 987	734 136	681 452	700 149
40 ~ 60	455 369	554 561	559 787	505 978	521 987	604 523	635 287
60 ~ 80	422 568	476 512	521 114	486 321	504 567	543 215	573 298
80 ~ 100	429 668	501 325	513 578	523 486	562 247	621 563	631 486
总计	2 648 725	2 997 227	3 096 614	3 104 908	3 308 818	3 470 723	3 588 567

经过一个生育期，改良耕地中盐分通过灌溉淋洗未能将土壤中的盐分排出土体，同时因为试验区夏季高温以及强烈的蒸发作用，土壤积盐 25.58%。

荒地中在整个生育期内一直处于积盐状态，10 月 20 日较 5 月 30 日积盐 35.48%，其中灌溉期改良耕地中地下水位抬升，导致耕荒地之间地下水交换频繁，

盐分向荒地迁移较多。

2.3.2 试验区地下水埋深和地下水 EC 变化

由图 6 可以看出,由于试验区东南高西北低,地下水埋深在试验区东南侧较深,西北侧较浅。由于改良耕地进行灌溉,荒地无灌溉,仅靠改良耕地地下水补给荒地,在灌溉期,改良耕地地下水明显高于荒地。试验区地下水埋深变化趋势基本一致,改良耕地灌溉后,地下水明显上升,地下水位在 60~100 cm,荒地地下水位随着耕地灌溉后同步上升,较改良耕地变化幅度减小,地下水位在 75~120 cm,因此,在改良耕地灌溉时地下水补给荒地较多,盐分也随之被带入荒地,主要集中在 60~100 cm 土体中。

盐分,防止土壤进一步恶化。

2.3.3 试验区水盐迁移估算

试验区改良耕地灌溉时,地下水位开始上升,耕荒地间地下水频繁地水平侧向交换,同时灌溉水中盐分渗透补给荒地,荒地中盐分积累,导致荒地盐分逐年增多。在荒地中,地下水的消耗主要靠试验区强烈的蒸发作用,地下水通过土壤毛管作用向上运移补给土壤水分,使地下水水位下降。

对葵花播种开始到秋浇前(5月30日至10月20日,共144 d)1 m 土体进行盐分迁移计算,由表 5 可知,在荒地中盐分积累总量为 939 842 kg/m²,0~60 cm 土壤中 587 294 kg/m²,占积盐量的 62.49%,为蒸发作用带动地下水补给到土壤中的盐分;如图 8 所示,60~80 cm、80~100 cm 土层平均地下水补给量分别为 0.51、0.45 mm/d,由图 7 和式(8)可知,地下水平均矿化度为 26.99 g/L,地下水补给盐分量为 71 116 kg/m²,占积盐量的 7.57%。因此,荒地土壤中的盐分主要是由于地下水补给将盐分带到土壤中,占盐分积累量的 70.06%。灌溉时期,由于改良耕地中地下水位在 60~100 cm 之间,荒地地下水位在 75~120 cm 之间,因此改良耕地地下水迁移给荒地的盐分集中在 60~100 cm 土体中,荒地土壤盐量为 214 578 kg/m²,占积盐量的 22.83%,由式(10)计算可知,改良耕地水平渗透给荒地的盐量为积盐量 7.11%。

3 讨论

土壤全盐、pH 值、养分以及离子组成能够反映盐渍化土壤的基本特征,也是区域盐碱地改良利用的基本依据^[37]。河套灌区受气候、地形、土壤母质和人为因素等的影响,导致灌区内土壤盐渍化严重^[38],因此许多学者研究河套灌区水盐运移规律,为改良和防治土壤盐渍化提供科学依据。李亮^[39]研究表明,盐荒地积聚盐分是一个动态平衡的过程,主要受到蒸发、降雨、地下水及耕地灌溉水等多方面因素的影响,盐荒地具有一定积累盐分能力,但动态变化较大,当荒地盐分积聚到一定程度时,积盐能力必将下降。黄权中等^[40]研究表明,河套灌区土壤盐分含量分布在空间上具有较强的规律性,主要受上、中、下游各灌域灌溉、排水条件及地下水埋深差异影响。同时,在灌区局部地区影响因素复杂,土壤盐渍化空间分布也呈现出明显的不均匀性。因此需要进一步采取一定的措施进行盐渍化土壤的防治。试验区北侧荒地盐分显著高于南侧改良耕地,且土壤 0~20 cm 土层盐分明显高于 20~40 cm 土层,土壤盐分表聚现象明显,荒地受自然因素影响,改良耕

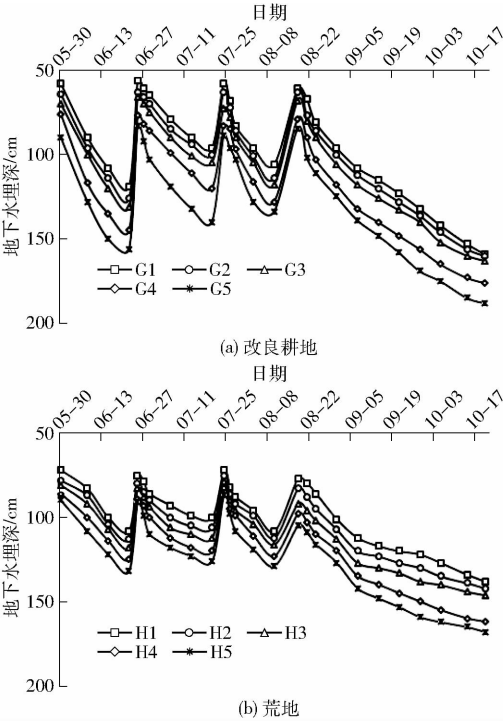


图 6 试验区地下水埋深动态变化曲线
Fig. 6 Dynamic changes of groundwater depth in test area

图 7 为试验区地下水 EC 时空变化图,由于试验区荒地多数为重度盐渍化土壤,有的甚至达到了盐土程度,因此在试验区北侧荒地中,地下水 EC 较高,同时试验区由于东南高、西北低的原因,导致盐分随着地下水由东南向西北方向迁移,日积月累导致试验区西北侧地下水盐分增大,因此荒地成为土壤的储盐区。由图可知,试验区西北侧地下水 EC 最大,高达 35.33~53.26 dS/m,改良耕地地下水平均 EC 为 10.40 dS/m,荒地地下水平均 EC 为 39.11 dS/m,地下水 EC 分布呈现条带状分布,存在较强的空间相似性。河套灌区由于蒸发强烈,且降雨稀少,地下水中的盐分会随着毛管水上升到土壤中,因此试验区应当采取一定的措施控制地下水中

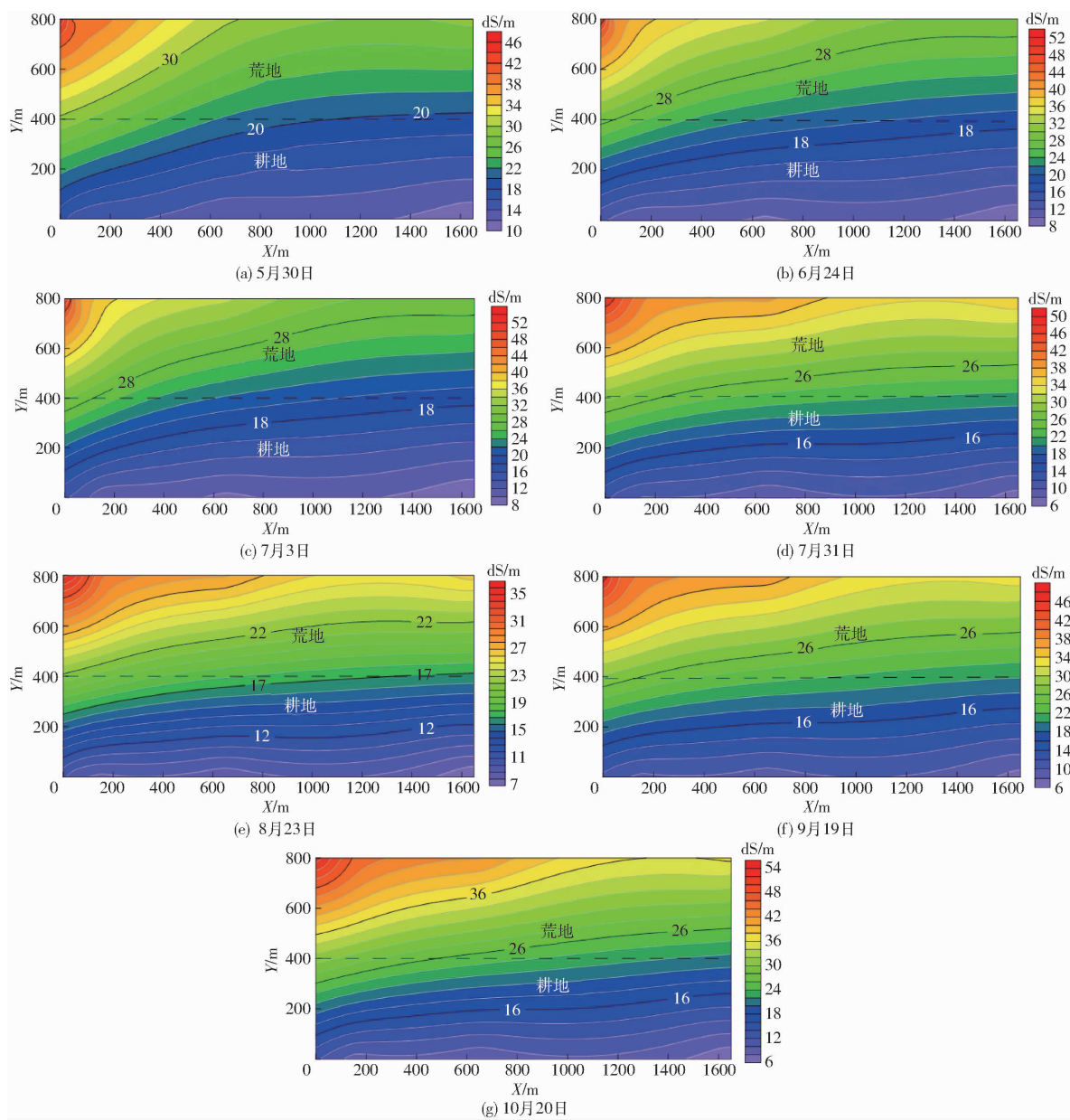


图 7 试验区地下水 EC 时空变化

Fig. 7 Spatiotemporal variations of groundwater EC in test area

地灌溉淋洗,且试验区南高北低,盐分通过深层渗漏或水平运移到荒地土壤中,荒地成为灌区盐分的贮存地,同时荒地盐分也通过对流-弥散作用反侵蚀耕地,盐分形成动态平衡^[41]。河套灌区夏季气温高、降水少,蒸发量不断增大,在长期持续的强烈蒸发作用下,包气带毛细水上升,把深层土壤以及地下水中的可溶性盐类带到土壤表层,而耕地由于种植作物,增加了地表覆盖度,减少土壤水分蒸发,从而能有效抑制土壤返盐^[42-43]。灌溉使土壤表层的盐分淋洗到土壤深层,也抑制了土壤返盐程度。河套灌区地下水中含盐量较大,地下水埋深较浅,由于强烈的蒸发作用,导致地表聚积盐分。因此需要建设健全的灌溉与排水系统来有效地控制地下水位,从而防治土壤次生盐渍化,同时灌区农田排水踏沟严重,地

下径流不畅,排水效果微乎其微。因此,结合土壤化学改良,采用暗管排水排盐技术控制地下水位、同时靠排水排盐来改良盐碱地是一个很好的选择^[44]。

冗余分析是将样点投射到两条排序轴构成的二维平面上,通过样点的散集形态、在象限的分布等来反映研究区的特点。在 RDA 二维排序图上直观地给出各盐分离子以及与土壤全盐、pH 值、养分之间的关系,并通过各盐分离子与研究对象前两个排序轴的相关系数,来确定影响试验区土壤盐渍化的主要因子,与传统的统计学相比较,冗余分析能够更加清楚地表明影响土壤盐渍化的主要因素,因此,冗余分析是一种更加科学的分析土壤盐碱化变化特征的评价方法。

土壤中盐分随水迁移是一个相当复杂的过程,

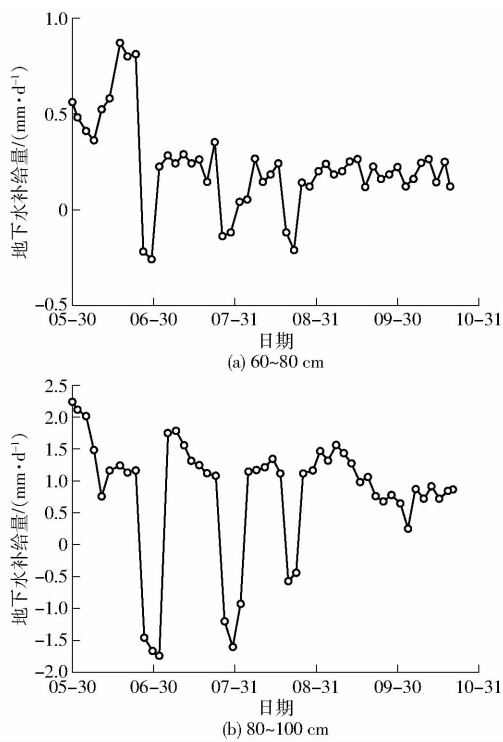


图8 荒地地下水补给量

Fig.8 Groundwater recharge of wasteland

岳卫峰等^[45]研究表明,在研究区农田土壤中的部分盐分随灌溉水的入渗,被带入到地下水,分别有53%和22%的盐分随地下水进入到盐荒地和水域。王国帅等^[27]指出,耕地-荒地-海子是河套灌区典型的地类,是灌区盐分重分配的主要区域。在灌溉时期,地下水的水力梯度较大,地下会水由耕地向荒地再向海子迁移,海子成为储盐区。在整个生育周期内,耕地地下水迁移给荒地深层土壤盐量为114 015 kg/hm²,占积盐量的30%;耕地水平渗透给荒地的盐量为43 305 kg/hm²,占积盐量11%。在本研究中,灌溉期耕地地下水迁移给荒地的盐分集中在60~100 cm土体中,占积盐量的22.83%,耕地水

平渗透给荒地的盐量占积盐量7.11%。耕地中土壤盐分向荒地中迁移量相对较小,原因为试验区在灌溉时期水力梯度相对较小,以及试验区土壤较黏,地下水迁移量相对较少,研究区盐分迁移也相对较少。

4 结论

(1)研究区内改良耕地和荒地土壤阴离子均以Cl⁻为主,分别占阴离子总量的45.27%、58.78%,阳离子以Na⁺为主,分别占阳离子总量的60.67%、53.94%。改良耕地和荒地的土壤全盐量秋季比春季分别降低了51.9%、35.08%;荒地中土壤盐分含量明显高于改良耕地。荒地全盐平均值在7.0 g/kg以上,土壤盐渍化程度较重。

(2)改良耕地有效磷与Na⁺呈显著负相关($P < 0.05$),荒地中速效钾与K⁺呈显著正相关($P < 0.05$),有效磷与Na⁺呈显著负相关($P < 0.05$);荒地中盐分较高,盐离子含量较多,对土壤养分含量影响较大。在前2个排序轴中,改良耕地研究对象与环境关系的变量累积百分比分别为71.38%、71.65%,荒地研究对象与环境关系的变量累积百分比分别为89.02%、89.16%,反映出改良耕地与荒地各自的研究对象与环境变量之间的线性关系。改良耕地中Na⁺对全盐、pH值、土壤养分的影响最大,其次是Ca²⁺;荒地中Na⁺对全盐、pH值、土壤养分的影响最大,其次是K⁺。

(3)在作物一个生育周期内,荒地1 m土体中积盐量为939 842 kg/hm²。地下水补给将盐分带到土壤中,占盐分积累量的70.06%,灌溉期改良耕地地下水迁移给荒地的盐分集中在60~100 cm土体中,占积盐量的22.83%,改良耕地水平渗透给荒地的盐量占积盐量7.11%。

参 考 文 献

[1] 刘晓涵,马静,韩秋静,等. 洛阳典型植烟土壤肥力特征及其与土壤盐分关系分析[J]. 中国烟草科学,2018(6):24-31. LIU Xiaohan, MA Jing, HAN Qiuqing, et al. Soil fertility and its relationship with soil salinity in tobacco-planting areas of Luoyang, Henan Province[J]. Chinese Tobacco Science, 2018(6):24-31. (in Chinese)

[2] 刘玉国,杨海昌,王开勇,等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. 农业工程学报,2014,30(16):84-90. LIU Yuguo, YANG Haichang, WANG Kaiyong, et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):84-90. (in Chinese)

[3] IVITS E, CHERLET M, TOTH T, et al. Characterisation of productivity limitation of salt-affected lands in different climatic regions of Europe using remote sensing derived productivity indicators[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5):438-452.

[4] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报,2012, 32(4):1202-1210. GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4):1202-1210. (in Chinese)

[5] 窦旭,史海滨,苗庆丰,等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):246-253. DOU Xu, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt and the influence of

- groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(3):246–253. (in Chinese)
- [6] 吉别克·哈力克巴义,丁建丽,谢力扎提·哈布尔. 干旱区土地盐渍化时空动态变化及影响因子分析[J]. 水土保持研究,2011,18(4):112–116,278.
JIBIEKE·Halikebayi, DING Jianli, XIELIZAT·Habul. Analysis on tempo-spatial dynamic change and driving factors on soil salinification in arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation,2011,18(4):112–116,278. (in Chinese)
- [7] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(2):409–417.
XU Mingxiang, LIU Guobin, ZHAO Yunge. Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly loess plateau region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(2):409–417. (in Chinese)
- [8] 赵庆庆,白军红,高永超,等. 黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征[J]. 农业环境科学学报,2019,38(3):641–649.
ZHAO Qingqing, BAI Junhong, GAO Yongchao, et al. Variations in soil salt ions along a water and salinity gradient in the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2019,38(3):641–649. (in Chinese)
- [9] 王旭. 盐生植物生长发育与土壤盐分的关系及其对盐渍土的改良研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.
WANG Xu. Study on the relationship between growth and development of halophytes and soil salinity and its improvement on saline soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2016. (in Chinese)
- [10] 郭全恩,王益权,马忠明,等. 植被类型对土壤剖面盐分离子迁移与累积的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(13):2711–2720.
GUO Quanen, WANG Yiquan, MA Zhongming, et al. Effect of vegetation types on soil salt ions transfer and accumulation in soil profile[J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(13):2711–2720. (in Chinese)
- [11] DEHAAN R L, TAYLOR G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. Remote Sensing of Environment,2002,80(3):406–417.
- [12] CSILLAG F, PÁSZTOR L, BIEHL L L. Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils[J]. Remote Sensing of Environment,1993,43(3):231–242.
- [13] WANG D, WILSON C, SHANNON M C. Interpretation of salinity and irrigation effects on soybean canopy reflectance in visible and near-infrared spectrum domain[J]. International Journal of Remote Sensing,2002,23(5):811–824.
- [14] 吴月茹,王维真,王海兵,等. 黄河上游盐渍化农田土壤水盐动态变化规律研究[J]. 水土保持学报,2010,24(3):80–84.
WU Yueru, WANG Weizhen, WANG Haibing, et al. Study on soil moisture and salt dynamic variation of saline farmland in upper reaches of Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(3):80–84. (in Chinese)
- [15] 于子博,庄涛,白军红,等. 黄河三角洲潮间带盐地碱蓬湿地土壤磷含量和储量的季节动态变化特征[J]. 农业环境科学学报,2019,38(3):633–640.
YU Zibo, ZHUANG Tao, BAI Junhong, et al. Seasonal dynamics of soil phosphorus contents and stocks in *Suaeda salsa* wetlands in the intertidal zone of the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2019,38(3):633–640. (in Chinese)
- [16] 刘文全,于洪军,徐兴永. 莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究[J]. 土壤学报,2014,51(6):1213–1222.
LIU Wenquan, YU Hongjun, XU Xingyong. Rules of variation of salt ions in soil profiles in South Coastal Area of Laizhou Bay [J]. Acta Pedologica Sinica,2014,51(6):1213–1222. (in Chinese)
- [17] 张明,高超,尹爱经,等. 滩涂区不同围垦年限土壤总盐及盐基离子含量变化规律[J]. 农业工程学报,2018,34(1):118–126.
ZHANG Ming, GAO Chao, YIN Aijing, et al. Variation in soil total salt and base ions content of tidal-flat reclamation with different years[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):118–126. (in Chinese)
- [18] 刘春卿,杨劲松,陈德明. 管理调控措施对土壤盐分分布和作物体内盐分离子吸收的作用[J]. 土壤学报,2004,41(2):230–236.
LIU Chunqing, YANG Jinsong, CHEN Deming. Effect of regulatory measures on distribution of soil salt and ionic uptake by crop [J]. Acta Pedologica Sinica,2004,41(2):230–236. (in Chinese)
- [19] 刘文全,于洪军,徐兴永,等. 基于地统计学的莱州湾南岸土壤盐分离子的空间变异性研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(8):4802–4805.
LIU Wenquan, YU Hongjun, XU Xingyong. Spatial variability of soil salt ions in the South Coast of Laizhou Bay based on geostatistics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(8):4802–4805. (in Chinese)
- [20] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(11):106–112.
YAO Rongjiang, YANG Jingsong. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soils in the Yellow River Delta [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,21(11):106–112. (in Chinese)
- [21] 杨帆,邓伟,章光新,等. 苏打盐渍土地区芦苇地土壤盐分离子空间变异与群落关系研究[J]. 土壤学报,2008,45(4):594–600.
YANG Fan, DENG Wei, ZHANG Guangxin, et al. Spatial variation of soil saline ions and its relations with vegetation community of phragmites *Australis* in a saline-sodic soil[J]. Acta Pedologica Sinica,2008,45(4):594–600. (in Chinese)
- [22] 王丹,康跃虎,万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. 农业工程学报,2007,23(2):83–87.

- WANG Dan, KANG Yuehu, WAN Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under drip irrigation with saline water[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 83–87. (in Chinese)
- [23] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区土壤水溶性盐基离子高光谱综合反演模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 344–355.
- SUN Ya'nan, LI Xian Yue, SHI Haibin, et al. Hyperspectral integrated inverse model for water-soluble salt ions content in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 344–355. (in Chinese)
- [24] 李彬. 节水改造后盐渍化灌区农田水盐环境变化与预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- LI Bin. Change and forecast of farmland water-salt environment after water saving reform implemented for salinity region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [25] 刘霞, 王丽萍, 张圣微, 等. 内蒙古河套灌区灌排水离子组成及淋洗盐分用水量评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 500–505.
- LIU Xia, WANG Liping, ZHANG Shengwei, et al. Evaluation of irrigation and drainage water cation composition and salt leaching requirement in Hetao Irrigation District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 500–505. (in Chinese)
- [26] 韩宁, 陈蜀江, 朱选, 等. 基于冗余分析的伊犁新垦绿洲不同农田土壤盐渍化特征研究[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 366–372.
- HAN Ning, CHEN Shujiang, ZHU Xuan, et al. Study on soil salinization characteristics of different farmland in new agricultural land reclamation Yili Oasis based on redundancy analysis[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(2): 366–372. (in Chinese)
- [27] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255–269.
- WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different land types in Hetao Irrigation Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 255–269. (in Chinese)
- [28] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子间水盐运移规律及平衡分析[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1518–1528.
- WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Analysis of water and salt transportation and balance during cultivated land, waste land and lake system in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1518–1528. (in Chinese)
- [29] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31–35.
- LI Liang, SHI Haibin, JIA Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 31–35. (in Chinese)
- [30] 任东阳, 徐旭, 黄冠华. 河套灌区典型灌排单元农田耗水机制研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 98–105.
- REN Dongyang, XU Xu, HUANG Guanhua. Irrigation water use in typical irrigation and drainage system of Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 98–105. (in Chinese)
- [31] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- TONG Wenjie. Study on salt tolerance of crops and cropping system optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [32] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [33] QADIR M, GHAFOR A, MURTAZA G. Amelioration strategies for saline soils: a review[J]. Land Degradation & Development, 2001, 12(4): 357–386.
- [34] 钱颖志, 朱炎, 伍靖伟, 等. 考虑排盐和控盐的干旱区暗管布局参数研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 74–83.
- QIAN Yingzhi, ZHU Yan, WU Jingwei, et al. Subsurface drains layout in arid areas with purposes of salt control and discharge[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 74–83. (in Chinese)
- [35] MORRIS C. Multivariate analysis of ecological data using Canoco 5, 2nd Edition[J]. Proceedings of the Annual Congresses of the Grassland Society of Southern Africa, 2015, 32(4): 289–290.
- [36] 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- GUO Quan'en. The response mechanism of soil salt ions transfer and diversity rule to environment factor[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [37] 杨思存, 逢焕成, 王成宝, 等. 基于典范对应分析的甘肃引黄灌区土壤盐渍化特征研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(1): 100–110.
- YANG Sicun, PANG Huancheng, WANG Chengbao, et al. Characterization of soil salinization based on canonical correspondence analysis method in Gansu Yellow River Irrigation District of Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(1): 100–110. (in Chinese)
- [38] 邹超煜, 白岗栓. 河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 143–148.
- ZOU Chaoyu, BAI Gangshuan. Formation cause and control methods about soil salinization in Hetao Irrigation Area[J]. Yellow River, 2015, 37(9): 143–148. (in Chinese)

4); 181 – 198.

[30] HEATHMAN G C, COSH M H, MERWADE V, et al. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana[J]. CATENA, 2012, 95: 91 – 103.

[31] FRANZ T E, ZREDA M, FERRÉ T P A, et al. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources[J]. Water Resources Research, 2012, 48(8): 515.

[32] FRANZ T E, ZREDA M, ROSOLEM R, et al. Field validation of a cosmic-ray neutron sensor using a distributed sensor network[J]. Vadose Zone Journal, 2015, 11(4): 841 – 852.

[33] ROSOLEM R, SHUTTLEWORTH W J, ZREDA M, et al. The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(5): 1659 – 1671.

[34] DESILETS D, ZREDA M, FERRÉ T P A. Nature’s neutron probe; land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays [J]. Water Resources Research, 2010, 46(11): 505.

[35] DESILETS D, ZREDA M, PRABU T. Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides; new measurements at low latitude[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246(3 – 4): 265 – 276.

[36] DESILETS D, ZREDA M. Spatial and temporal distribution of secondary cosmic-ray nucleon intensities and applications to in situ cosmogenic dating[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 206(1 – 2): 21 – 42.

[37] DESILETS D M. Cosmogenic nuclides as a surface exposure dating tool; improved altitude/latitude scaling factors for production rates[D]. Tucson: The University of Arizona, 2005.

[38] YANG L, WEI W, CHEN L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3199 – 3217.

[39] 郭建平. 植物对降水截留的研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(6): 641 – 652.

GUO Jianping. Research progress of precipitation interception by plants[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(6): 641 – 652. (in Chinese)

[40] ROWE L K. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 1983, 66(1 – 4): 143 – 158.

[41] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 199 – 206.

MA Xuehua, YANG Maorui, HU Xingbi. A study on hydrological function of subtropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29(3): 199 – 206. (in Chinese)

[42] ASDAK C, JARVIS P G, GARDINGEN P V, et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia[J]. Journal of Hydrology, 1998, 206(3 – 4): 237 – 244.

[43] BALDOCCHI D. Evaporation in the uplands[J]. Agricultural Water Management, 1991, 20(1): 84 – 85.

(上接第 290 页)

[39] 李亮. 基于遥感技术与 HYDRUS – 1D 模型河套灌区盐荒地水盐运移规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.

LI Liang. Study on the transport of soil water and salt based on remote sensing technology and HYDRUS – 1D model in Hetao Irrigation District[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[40] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 102 – 109.

HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 102 – 109. (in Chinese)

[41] 李亮, 李美艳, 张军军, 等. 基于 HYDRUS – 2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 66 – 71.

LI Liang, LI Meiyang, ZHANG Junjun, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS – 2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66 – 71. (in Chinese)

[42] 邹晓霞, 王维华, 王建林, 等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 309 – 316.

ZOU Xiaoxia, WANG Weihua, WANG Jianlin, et al. Time-spatial evolution characteristics of soil salinity in the Yellow River Delta under different land cultivation and natural conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 309 – 316. (in Chinese)

[43] 张冈, 周志宇, 张彩萍. 利用方式对盐渍化土壤有机质和盐分的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 15 – 20.

ZHANG Gang, ZHOU Zhiyu, ZHANG Caiping. The effect of land use on the levels of salt and organic matter in saline soil[J]. Pratacultural Science, 2007, 16(4): 15 – 20. (in Chinese)

[44] 于淑会, 刘金铜, 李志祥, 等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1664 – 1672.

YU Shuhui, LIU Jintong, LI Zhixiang, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1664 – 1672. (in Chinese)

[45] 岳卫峰, 杨金忠, 童菊秀, 等. 干旱地区灌区水盐运移及平衡分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 623 – 626, 632.

YUE Weifeng, YANG Jinzhong, TONG Juxiu, et al. Transfer and balance of water and salt in irrigation district of arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 623 – 626, 632. (in Chinese)