

河套灌区地下水埋深与土壤盐分 对增强型植被指数的联合影响

马小茗¹,李瑞平¹,李鑫磊¹,潘红梅²,王向东³,李玉敏³

(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.内蒙古河套灌区水利发展中心解放闸分中心沙壕渠
试验站,内蒙古 巴彦淖尔 015000;3.内蒙古河套灌区水利发展中心解放闸分中心,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为研究干旱半干旱地区地下水埋深与土壤盐分对作物生长的联合影响,以河套灌区解放闸灌域主要种植作物(小麦、玉米、葵花)为研究对象,利用遥感影像提取增强型植被指数,野外试验获取0~20、0~40 cm土层土壤含盐量及地下水埋深数据,构建双因素坐标系确定地下水埋深和土壤含盐量对植被指数的联合响应,统计得出适宜作物生长的土壤含盐量及地下水埋深范围,研究结果表明:(1)5—6月小麦生长地下水埋深最适宜的范围分别为0.99~2.01、1.03~1.54 m,其对应的土壤含盐量分别为1.00~1.30、1.53~2.02 g·kg⁻¹;(2)6—8月玉米生长地下水埋深最适宜的范围分别为1.56~1.80、1.82~2.00、1.43~2.31 m;其对应的土壤含盐量分别为1.24~1.68、1.25~1.55、0.98~1.40 g·kg⁻¹;(3)7—8月葵花生长地下水埋深最适宜的范围分别为0.75~1.70、1.20~1.61 m,其对应的土壤含盐量分别为1.46~1.70、5.55~5.84 g·kg⁻¹。

关键词:地下水埋深;土壤盐渍化;增强型植被指数;作物生长;河套灌区

中图分类号:S273.4 **文献标志码:**A

Combined effects of groundwater depth and soil salinization on Enhanced Vegetation Index in Hetao irrigation area

MA Xiaoming¹, LI Ruiping¹, LI Xinlei¹, PAN Hongmei², WANG Xiangdong³, LI Yumin³

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
2.Shahao Canal Test Station, Jiefangzha Sub-center, Water Conservancy Development Center of Hetao Irrigation District,
Bayannur, Inner Mongolia 015000, China; 3.Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development
Center Jiefangzha Sub-center, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: To study the combined effects of groundwater depth and soil salinity on crop growth in arid and semi-arid regions, the main crops of wheat, maize and sunflower in Jiefangzha irrigation area of Hetao irrigation district were taken as the research objects in this study. The enhanced vegetation index was extracted by using remote sensing images. The data of soil salinity and groundwater depth in 0~20 cm and 0~40 cm soil layers were obtained by field experiments. The dual-factor coordinate system was constructed to determine the combined response of groundwater depth and soil salinity to vegetation index. The soil salinity and groundwater depth range suitable for crop growth were obtained by statistics. The results showed that: (1) The most suitable ranges of groundwater depth for wheat growth in May and June were 0.99~2.01 m and 1.03~1.54 m, respectively, and the corresponding soil salinities were 1.00~1.30 g·kg⁻¹ and 1.53~2.02 g·kg⁻¹, respectively. (2) The most suitable groundwater depths for maize growth in June, July and August were 1.56~1.80, 1.82~2.00 m and 1.43~2.31 m, respectively, and the corresponding soil salinities were 1.24~1.68, 1.25~1.55, 0.98~1.40 g·kg⁻¹, respectively. (3) The most suitable ranges of groundwater depth for sunflower growth in July and August were 0.75~1.70 m and 1.20~1.61 m, respectively. The corresponding soil salinities were 1.46~1.70 g·kg⁻¹ and 5.55~5.84 g·kg⁻¹, respectively.

收稿日期:2022-05-24

修回日期:2022-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51839006,52069021)

作者简介:马小茗(1998-),女,辽宁鞍山人,硕士研究生,研究方向为遥感监测农作物生长。E-mail:2228416016@qq.com

通信作者:李瑞平(1973-),男,内蒙古呼和浩特人,教授,主要从事节水灌溉与农业水利遥感信息技术研究。E-mail:nmgllrp@163.com

Keywords: groundwater depth; soil salinization; *EVI*; crop growth; Hetao irrigation area

据统计我国耕地中土壤盐渍化面积约为 921 hm^2 , 占全国耕地面积的 6.62%^[1]。河套灌区由于传统灌溉农业导致地下水埋深较浅, 同时当地气候干旱, 导致土壤水分和潜水强烈蒸发, 大量盐分聚集在土壤表层, 土壤盐渍化问题对于干旱半干旱地区土地的可持续利用、农业用地生产力和粮食安全产生不利影响^[2]。内蒙古河套灌区作为西北地区典型的盐渍化灌区, 当地农业生产受到土壤盐渍化问题的困扰。土壤盐分的运移主要以地下水为载体, 因此地下水埋深是影响土壤盐渍化程度的主要因素之一^[3]。一般情况下, 当地下水埋深较浅时, 由于干旱区强烈的蒸发作用会造成地表盐分累积使土壤发生盐渍化的风险增大, 进而导致作物生长受到盐分胁迫; 而地下水埋深较深时, 地下水无法及时补给作物根系层而导致水分胁迫, 进而影响作物生长^[4], 因而适宜的地下水埋深能够改善作物的土壤环境, 促进作物生长发育^[5]。因此控制合理的地下水埋深与土壤含盐量对保证灌区作物生长具有重要作用。

植被指数是反映作物长势和营养信息的重要参数之一, 是目前较为常用的表征植被状况的指标, 对植被长势和生物量非常敏感, 在一定程度上代表植被覆盖变化^[6]。因此植被指数常被广泛应用于长势监测、植被类型监测、作物估产及植被覆盖度等研究^[7-10]。Jin 等^[11]利用遥感技术和野外测量方法研究了银川平原地下水埋深与土壤含盐量及作物的关系; 郑倩等^[12]对河套灌区解放闸灌域植被指数与地下水埋深进行定量分析, 结果表明两者存在显著线性关系。国外部分学者分析得出地下水埋深是影响土壤盐渍化的主要因素之一, 且地下水埋深与土壤盐渍化均对植被生长存在着一定的影响, 而植被生长与地下水埋深呈显著负相关关系, 与土壤含盐量呈显著正相关关系, 因此应该对土壤盐渍化及地下水埋深对作物生长的影响进行分析^[13-15]。前人研究一般只强调某个因素对植被生长的影响, 联合考虑地下水埋深及土壤盐分对作物生长的影响研究较少。齐蕊等^[16]利用地下水埋深与干旱指数建立双因素坐标系来确定植被指数对地下水和气候背景的联合响应, 结果表明双因素定量分析的结果优于单因素定量分析。因此, 本文选取河套灌区解放闸灌域定量分析土壤表层含盐量与地下水埋深二者联合对作物生长的影响, 基于土壤含盐量、地下水埋深和植被指数, 建立双因素坐标系, 寻求适宜作物生长的土壤含盐量及地下水

埋深, 以期灌区优化种植结构、调控地下水埋深、防治土壤盐渍化等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部的巴彦淖尔市, 研究区域为河套灌区解放闸灌域 ($40^{\circ}26' \sim 41^{\circ}18'N$, $106^{\circ}34' \sim 107^{\circ}37'E$), 是河套灌区内重要的粮食基地, 主要种植作物为小麦、玉米、葵花^[17]。灌域属中温带大陆性干旱季风气候, 干旱少雨, 蒸发量大, 无霜期短, 日照时数长, 昼夜温差大。灌域年平均降雨量 135.9 mm, 多集中在 6—9 月; 年蒸发量为 1 984.3 mm, 是年均降雨量的 15 倍。由于当地干旱少雨的气候, 农业发展主要依靠引黄灌溉。

1.2 数据收集

本研究在河套灌区解放闸灌域内共布设 46 眼地下水位观测井和 40 个土壤盐分采样点布置如图 1(见 138 页)。野外试验在 2021 年 4 月 18 日、5 月 25 日、6 月 15 日、7 月 12 日、8 月 16 日分别采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层深度的土样, 测定其电导率值 $EC_{1:5}$ (按土水比为 1:5 配制饱和浸提液的电导率), 并根据当地经验公式^[18]计算土壤盐分含量。通过加权平均计算 0~20 cm 和 0~40 cm 土壤含盐量。地下水埋深采用绳测法测定, 于每月 1、5、11、16、21、26 日进行地下水埋深监测。遥感影像采用 Landsat 系列影像, 在作物生育期内筛选出四期影像进行植被指数计算。

1.3 植被指数

目前, 归一化植被指数 (*NDVI*) 是大区域尺度研究植被覆盖度应用最为广泛的植被指数, 但 *NDVI* 在植被覆盖度较高的地区容易达到饱和而造成误差, 并且容易受到大气干扰和土壤背景的干扰^[19]。增强型植被指数 (Enhanced vegetation index, *EVI*) 弥补了 *NDVI* 的不足, *EVI* 指数改进了 *NDVI* 指数在处理大气折射、土壤反射、植被饱和等方面的不足, 其计算公式为:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L} \quad (1)$$

式中, ρ_{NIR} 、 ρ_{red} 和 ρ_{blue} 分别为大气校正过的近红外、红光和蓝光波段的反射率。L 为土壤调节参数, 参数 C_1 、 C_2 则用于通过蓝光波段来修正大气对红光波段的影响, G 为增益系数。在计算 *EVI* 时, 通常取 $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $G = 2.5$ 。

1.4 处理方法

提取采样点处遥感计算的增强型植被指数 (*EVI*),根据实测的土壤含盐量以及地下水埋深,利用 Surfer 软件中的克里金插值法,以土壤盐分为 x 轴、地下水埋深为 y 轴、*EVI* 为 z 轴,建立双因素坐标系,得到 *EVI* 二维分布特征图,双因素坐标系相当于三维坐标系,以 z 为因变量, x 、 y 为自变量,探究两个变量对因变量的共同影响,定量表现地下水埋深和土壤盐分与植被指数的联合相关性,统计分析适宜作物生长的地下水埋深及土壤含盐量范围。

2 结果与分析

2.1 播种前土壤含盐量与地下水埋深统计特征

河套灌区大量引黄灌溉造成地下水埋深较浅,同时也引入大量盐分,灌区多数地区排水不畅,水、盐多以向上运移为主,同时灌区春季干燥多风且地表植被覆盖度较低,蒸发强度较大,此时若地下水过少则会加剧盐分在土壤表层的累积,从而使土壤盐渍化加重。将采样点处的地下水埋深(H)按常规分为 4 类^[20] 进行统计分析(图 2a)得出, $H\leq 2.5$ m 占比达 67.44%; $H>2.5$ m 所占比例较高的主要原因是灌域内存在部分井灌区,地下水埋深较深。对采样点处的土壤盐分进行土壤盐渍化等级划分^[21],由图 2b 可知,非盐渍土和轻度盐渍土占采样点的 85.71%,表明耕地中大部分为非盐渍土和轻度盐渍土。

根据解放闸灌域地下水埋深与土壤含盐量空间分布图(图 3,见 138 页)可知,灌域东南部地区地下水埋深较大,其对应的土壤盐分较小;而灌域东南部地区地下水埋深较浅,其对应的土壤含盐量较大。从二者空间分布上来说,地下水埋深与土壤盐

分二者之间呈现负相关关系。

2.2 地下水埋深对植被指数的影响

地下水是作物生长所需水分的重要来源,地下水埋深对作物的生长发育过程有着很大的影响。图 4 反映了灌域内作物不同生育期地下水埋深变化及其对 *EVI* 的影响。根据 2021 年解放闸灌域的灌水资料可知,灌域于 5 月 7 日和 5 月 23 日对小麦地进行两次灌溉,此时小麦田地下水埋深较浅,在 1.0 m 左右,5—6 月小麦快速生长耗水量大,导致 6 月份地下水埋深下降;灌域于 6 月 26 日、7 月 15 日和 8 月 6 日对玉米地进行灌溉,灌水充分,地下水埋深变化较小,大都维持在 2.0 m 左右;灌域于 7 月 21 日在两次采样间对葵花地通过灌溉进行水分补给,而 7—8 月葵花进入快速生长期耗水量大,因此 8 月地下水埋深略低于 7 月。当地下水埋深较大时,在作物生长过程中地下水无法进行水分补给,影响作物生长,因此其对应的 *EVI* 值较小。根据图 4 中各作物在坐标系中的散点图分布可知,玉米及葵花地下水埋深大都在 2.0 m 左右分布时,作物长势较好;而小麦地下水埋深在 1.0 m 左右时长势较好。

2.3 土壤盐分对植被指数的影响

选取灌域内小麦、玉米和葵花 3 种作物营养生长阶段 0~20 cm 和 0~40 cm 土壤表层含盐量对作物生长的影响进行分析。由图 5 可知, *EVI* 随土壤盐分的增大而减小,二者呈负相关关系;且由图中散点分布可知,在同一点位上,0~20 cm 土层土壤含盐量大多大于 0~40 cm 土层土壤含盐量。从作物类型来看,不同作物田块的盐分分布存在明显差异,3 种作物中葵花地表层土壤含盐量最大,其主要原因是葵花的耐盐性较高,适宜盐分范围较广。由

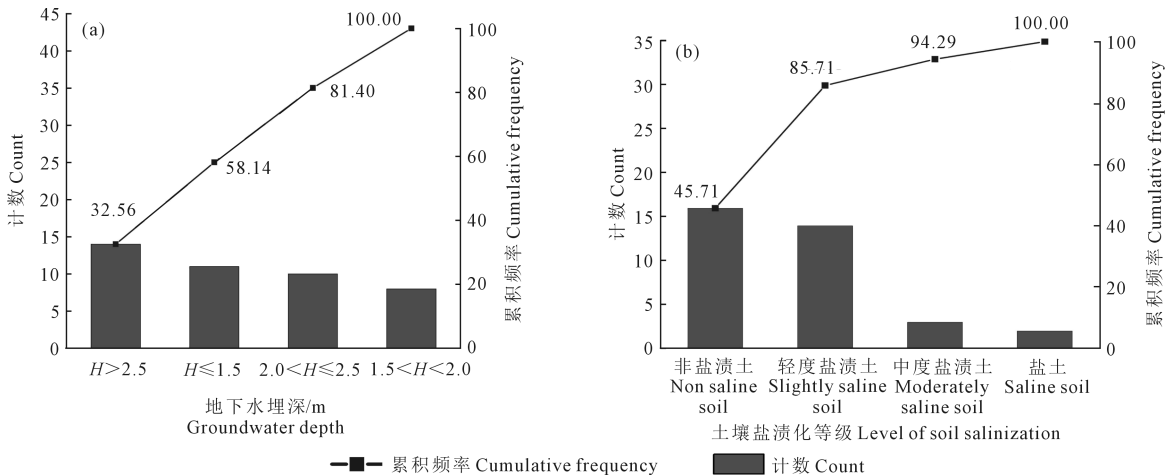


图 2 4 月份地下水埋深与 0~10 cm 土层土壤盐渍化等级统计特征图

Fig.2 Statistical characteristics of groundwater depth and soil salinization level of 0~10 cm soil layer in April

图 5c 可知, 8 月土壤含盐量明显大于 7 月, 其主要原因为 8 月份为葵花生育期后期, 葵花地属于积盐状态, 土壤表层盐分含量较高, 但当土壤表层盐分含量较高时, 其对应的 *EVI* 值较小, 表明尽管葵花耐盐性较好, 但其生长仍会受到土壤盐渍化的抑制; 根据图 5a 可知, 小麦 6 月表层土壤含盐量大于 5 月土壤表层含盐量, 5—6 月 0~40 cm 土层土壤含盐量与 *EVI* 的决定系数较高; 由图 5b 可知, 6 月 0~40 cm 土层土壤含盐量与 *EVI* 的 R^2 更大, 6 月土壤表层含盐量偏高的主要原因是由于 6 月采样时灌域还未对玉米地进行灌溉, 灌域在 6 月 26 开始对玉米地进行灌溉, 灌溉对土壤表层盐分有很好的淋洗作用, 因而 7 月土壤表层盐分开始变小, 7 月 0~20 cm 土层决定系数大于 0~40 cm 土层。灌域于 7 月 15 日再次对玉米地进行灌溉, 玉米在生育期内灌水充分, 因此 8 月玉米地土壤表层含盐量较小, 虽然两土层趋势线斜率相近, 但 0~20 cm 土层土壤含盐量与 *EVI* 的决定系数更大。

2.4 土壤表层盐分及地下水埋深双因素联合对植被指数的影响

根据上述分析可知, 土壤表层含盐量和地下水埋深对 *EVI* 均存在一定影响, 并且土壤含盐量与地下水埋深也相互联系, 故应该将二者联合加以考虑。图 6~8 反映了地下水埋深和土壤含盐量联合影响下作物植被指数分布特征。根据图 6~8 可知,

不同土层对应的作物 *EVI* 分布趋势大致相同。由图 5 土壤含盐量与 *EVI* 关系图可知, 小麦 5—6 月 0~40 cm 土层土壤含盐量与 *EVI* 的决定系数大于 0~20 cm 土层, 故利用 0~40 cm 土层土壤含盐量进行分析具有代表性; 同理, 玉米 6 月选择 0~40 cm 土层, 7—8 月选择 0~20 cm 土层进行分析; 葵花 7—8 月选择 0~20 cm 土层进行分析。

由图 6b 可知, 小麦在 5 月时 0~40 cm 土层土壤含盐量在 $1.00 \sim 1.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 地下水埋深为 $0.35 \sim 2.57 \text{ m}$, 此范围内对应的 *EVI* 值较大, 作物长势较好, 但植被指数最大值出现在土壤含盐量 $1.00 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 地下水埋深介于 $0.99 \sim 2.01 \text{ m}$ 区间内, 此范围作物长势最好。由等值线分布可知, 5 月小麦生长发育受地下水埋深的影响较大; 由图 6d 可知当土壤盐分较大或地下水埋深较深, 均不利于小麦生长, 当地下水埋深为 $1.03 \sim 1.54 \text{ m}$, 0~40 cm 土层土壤含盐量为 $1.53 \sim 2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区间内对应 *EVI* 最大, 最适宜小麦生长发育。

由图 7d 可知, 对于玉米而言, 6 月时地下水埋深为 $1.24 \sim 2.10 \text{ m}$, 0~40 cm 土层土壤含盐量为 $1.40 \sim 1.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右时 *EVI* 值较大, 此范围地下水埋深及土壤含盐量较适宜玉米生长, 地下水埋深为 $1.56 \sim 1.80 \text{ m}$ 时对应 0~40 cm 土层土壤含盐量为 $1.24 \sim 1.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内 *EVI* 值最大, 此范围内玉米长势最好。由图 7b 分布可知, 当地下水埋深小于 2.52 m 、

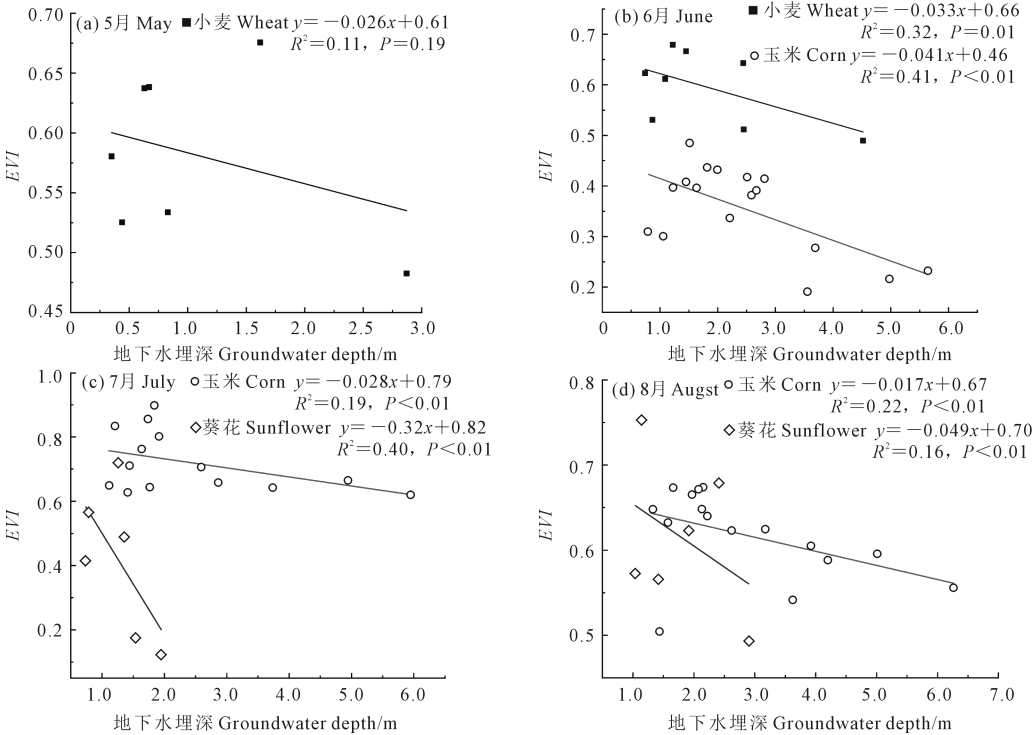


图 4 不同月份地下水埋深与 *EVI* 关系图

Fig.4 Relationship between underground depth and *EVI* in different months

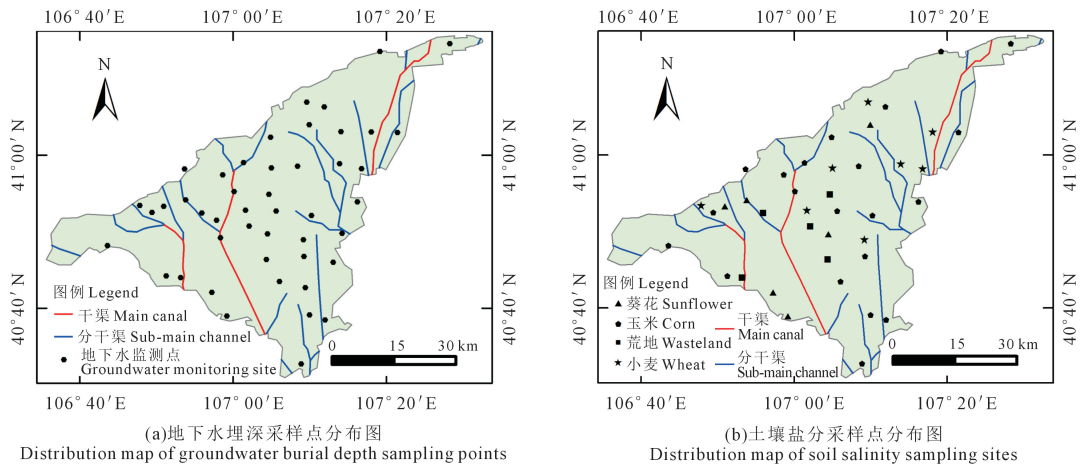


图 1 采样点分布图
Fig.1 Distribution diagram of sampling points

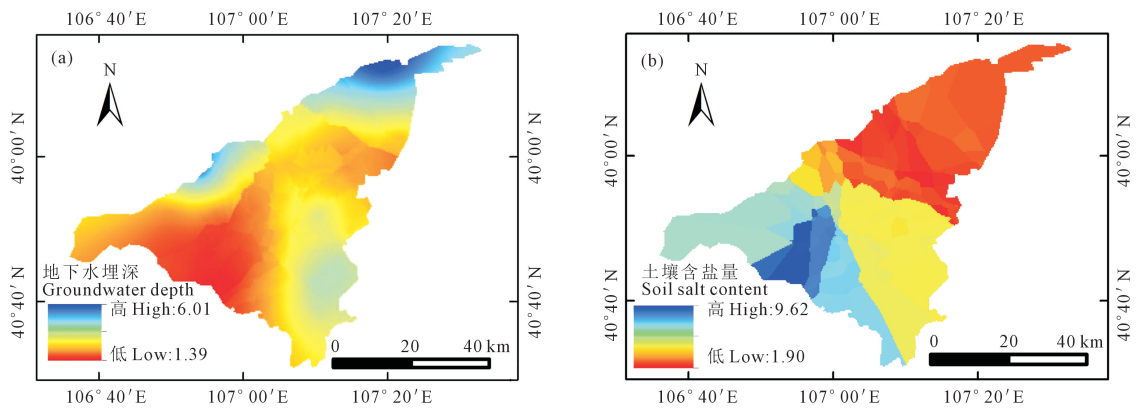


图 3 4 月份解放闸灌域地下水埋深及 0~10 cm 土壤含盐量分布图

Fig.3 Distribution map of groundwater depth and soil salinity of 0~10 cm in the Jiefangzha irrigation area in April

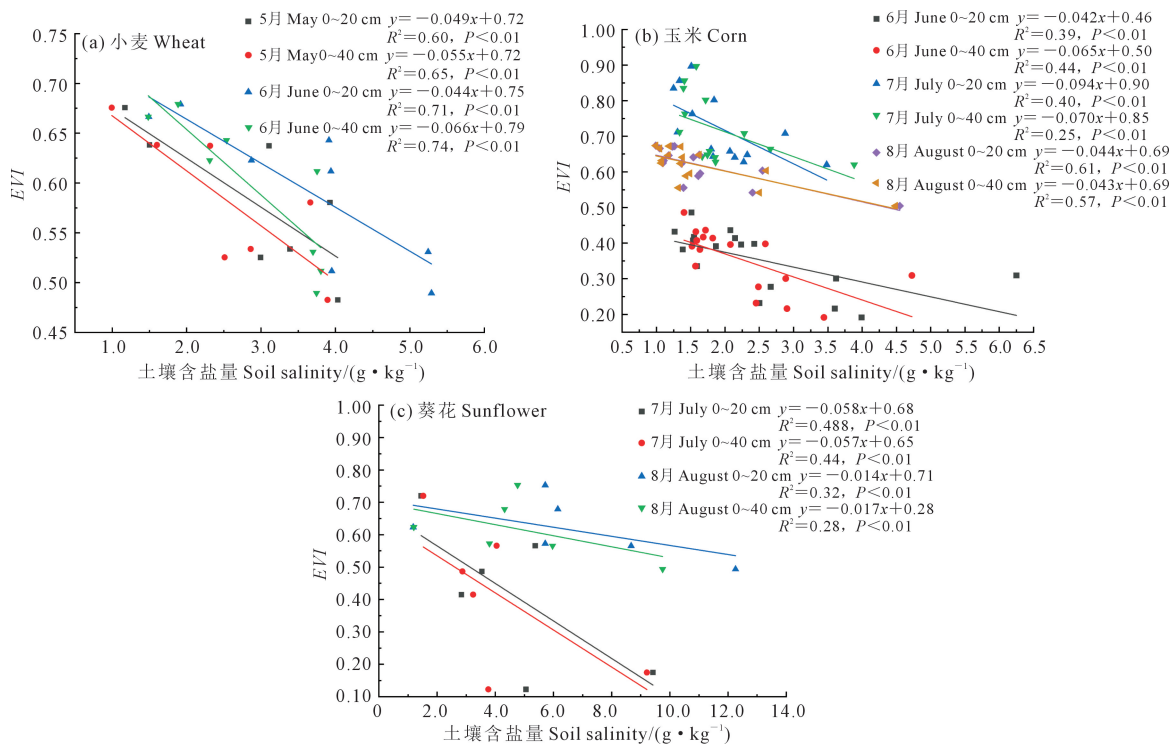


图 5 不同作物土壤含盐量与 EVI 关系图

Fig.5 Relationship between soil salinity and EVI of different crops

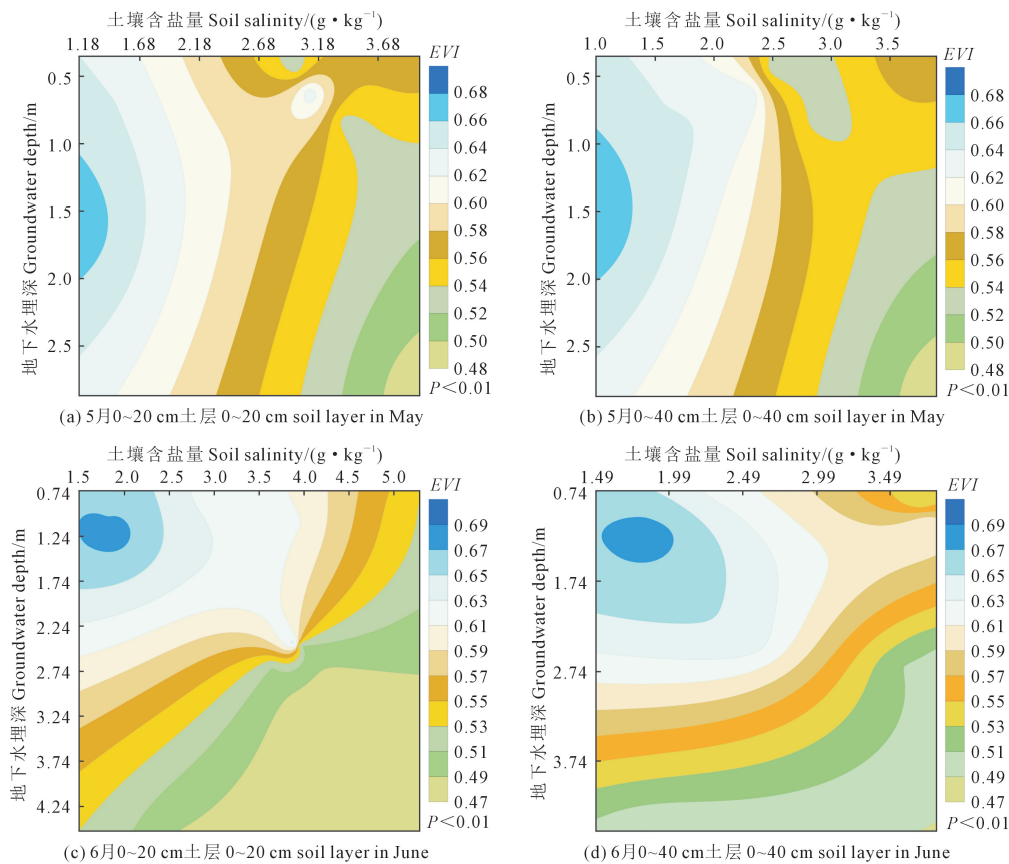


图 6 小麦土壤盐分和地下水埋深联合影响 EVI 的分布特征

Fig.6 EVI distribution characteristics under the joint influence of soil salinity and groundwater depth in wheat

土壤含盐量小于 1.80 m 范围内,等值线近似趋于与 x 轴平行,表明在此范围内 EVI 主要受土壤含盐量的影响;而 EVI 最大值出现在 0~20 cm 土层土壤含盐量为 1.25~1.55 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、地下水埋深为 1.82~2.00 m 区域,表明此范围最适宜玉米的生长发育。由 8 月土壤含盐量与地下水埋深的等值线图(图 7c)可知,EVI 随土壤含盐量及地下水埋深的增大而减小,且土壤含盐量对 EVI 影响较大,但 EVI 最大值出现在 0~20 cm 土层土壤含盐量为 0.98~1.40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、地下水埋深为 1.43~2.31 m 区域内。

由 7 月葵花土壤含盐量与地下水埋深等值线分布图(图 8a)可知,EVI 受地下水埋深的影响较大,最大值出现在 0~20 cm 土层土壤含盐量为 1.46~1.70 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、地下水埋深为 0.75~1.70 m 范围内;根据图 8c 可知,8 月 0~20 cm 土层土壤含盐量为 5.55~5.84 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、地下水埋深为 1.20~1.61 m 区域内对应 EVI 值最大。7—8 月葵花植被指数的等值线图近似平行于纵坐标地下水埋深,表明植被指数的变化受地下水埋深的影响较大。

3 讨论

根据已有研究可知,土壤表层土壤含盐量与地

下水埋深之间关系密切,作物播种前土壤盐渍化程度对作物播种及苗期生长有较大的影响,因此要对播种前土壤含盐量及地下水埋深进行分析,寻求适宜作物生长及出苗的地下水埋深及土壤含盐量。黄权中等^[2]分析得出播种前期地下水埋深控制在 2.0 m 时土壤含盐量控制在 2.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以内有利于作物出苗及前期生长。本文通过统计分析得出 4 月份时地下水埋深大多在 2.5 m 以下,耕地中大部分为非盐渍土和轻度盐渍土。

土壤盐渍化是制约干旱区农业发展的重要障碍,适宜的地下水埋深是防止土壤盐渍化和保持良好生态的关键^[20]。图 6~8 已经清楚地表明:研究区作物生长同时受到土壤盐分及地下水埋深的影响。马贵仁等^[21]分析得出河套灌区五原县盐渍化土壤典型区域应将地下水控制在 1.8~2.2 m,既有利于作物生长,又可在一定程度上减轻土壤次生盐渍化;常春龙等^[22]从地下水埋深与盐分关系入手得出小麦生育期适宜生长的地下水埋深应大于 1.4 m 为宜,玉米生育期内大于 1.6 m 为宜,葵花生育期内大于 1.0 m 为宜;童文杰等^[23-24]利用作物耐盐函数及耐盐性分析得出小麦田表层土壤含盐量低于 1.85 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时为最适宜生长区,玉米田土壤表层 0~20 cm

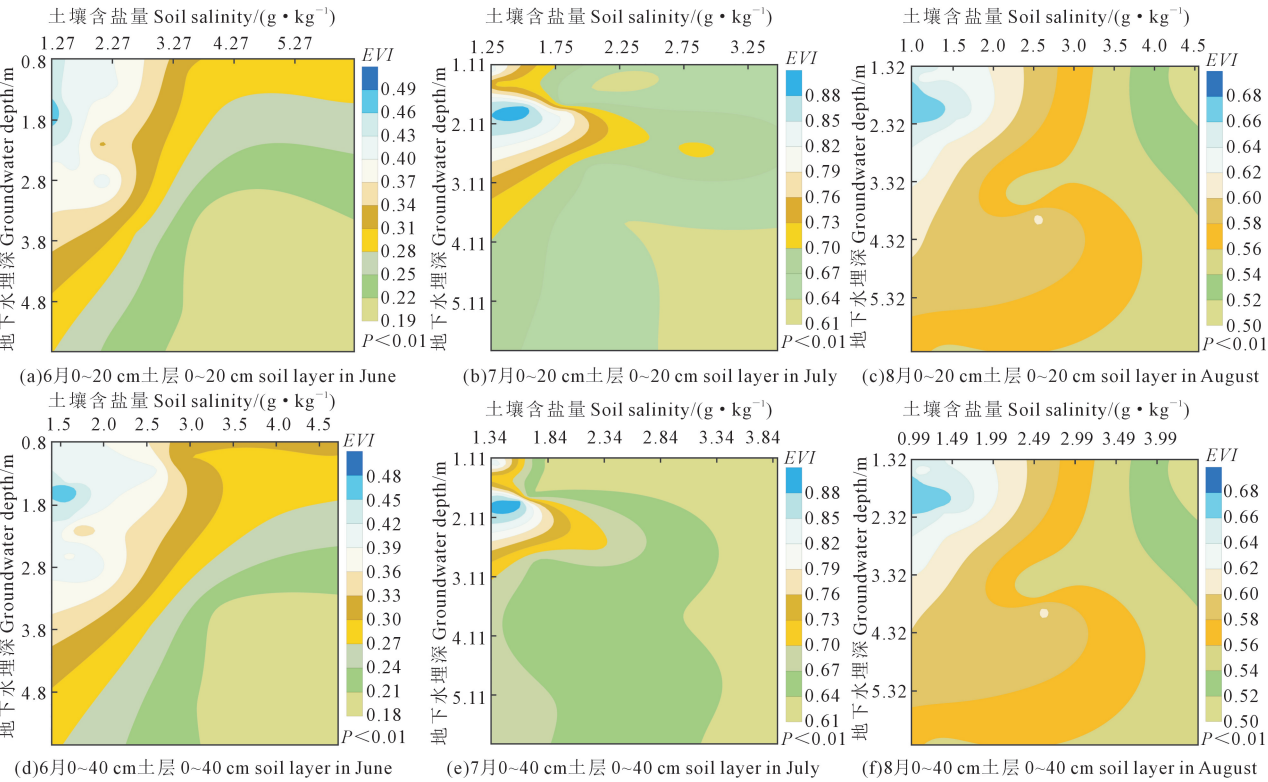


图 7 玉米土壤盐分和地下水埋深联合影响 EVI 的分布特征

Fig.7 EVI distribution characteristics under the joint influence of soil salinity and groundwater depth in maize

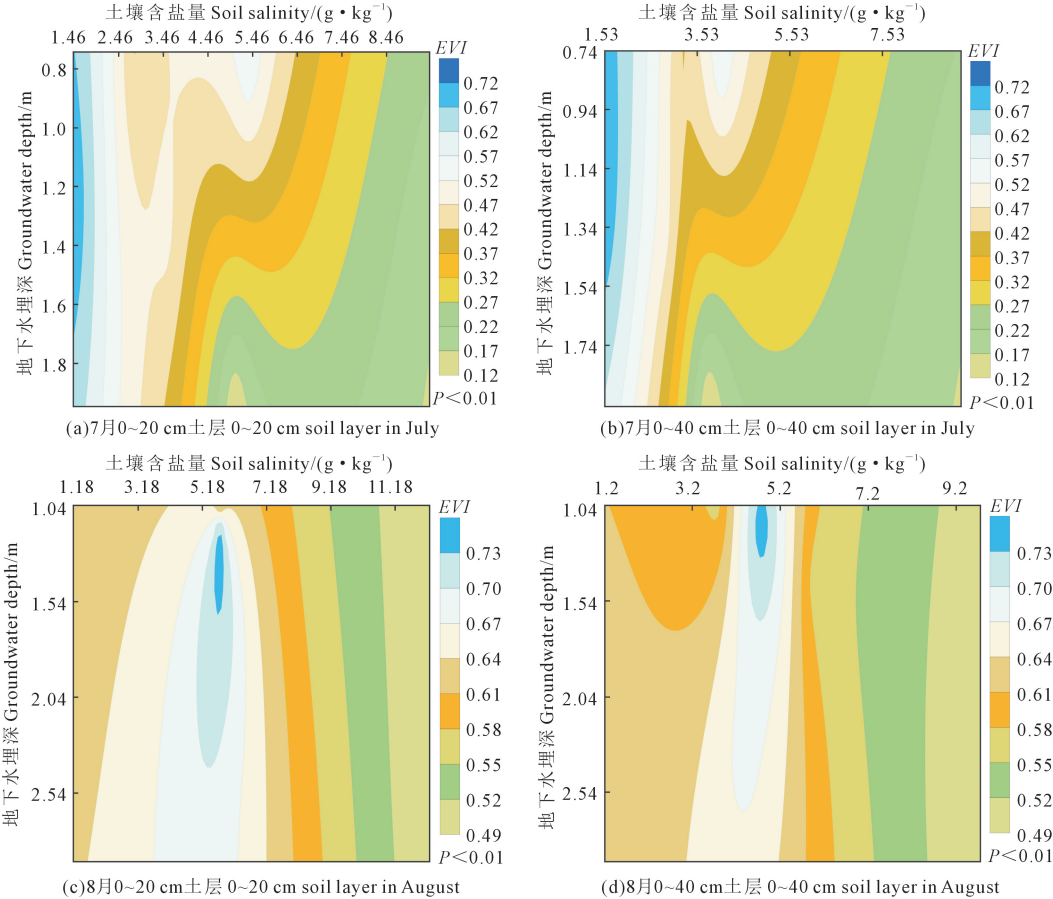


图 8 葵花土壤盐分和地下水埋深联合影响 EVI 的分布特征

Fig.8 EVI distribution characteristics under the joint influence of soil salinity and groundwater depth in sunflower

含盐量低于 $1.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时为最适宜生长区;孔繁瑞等^[25]通过在测坑中研究不同地下水埋深对盐分运移及作物生长的影响,得出埋深为 $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$ 时有利于作物生长,但将地下水埋深控制在 2.0 m 左右时有利于控制土壤盐渍化程度。前人研究多从土壤盐渍化对地下水埋深响应方面寻求适宜作物生长的地下水埋深。本文分析了地下水埋深及土壤盐分联合对作物生长的影响,进而寻求适宜作物生长的地下水埋深及土壤盐分。

4 结 论

1) 5—6月最适宜小麦生长的地下水埋深范围分别为 $0.99 \sim 2.01 \text{ m}$ 和 $1.03 \sim 1.54 \text{ m}$,其对应的土壤含盐量范围分别为 $1.00 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.53 \sim 2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

2) 6—8月适宜玉米生长的地下水埋深范围分别为 $1.56 \sim 1.80$ 、 $1.82 \sim 2.00$ 、 $1.43 \sim 2.31 \text{ m}$,其对应的土壤含盐量范围分别为 $1.24 \sim 1.68$ 、 $1.25 \sim 1.55$ 、 $0.98 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;

3) 7—8月最适宜葵花生长的地下水埋深范围分别为 $0.75 \sim 1.70$ 、 $1.20 \sim 1.61 \text{ m}$,其对应的土壤含盐量范围分别为 $1.46 \sim 1.70$ 、 $5.55 \sim 5.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 刘浩,左青松,刘婧怡,等. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(22): 19-23.
LIU H, ZUO Q S, LIU J Y, et al. Effects of salt-ion content on dry matter accumulation and distribution, agronomic traits and quality of rapeseed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(22): 19-23.
- [2] 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 Q Z, XU X, LV L J, et al. Soil salinity distribution and its effect on crop growth in Hetao irrigation area based on remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 102-109.
- [3] 李仙岳,崔佳琪,史海滨,等. 基于指示 Kriging 的土壤盐渍化风险与地下水环境分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 297-306.
LI X Y, CUI J Q, SHI H B, et al. Analysis of soil salinization risk and groundwater environment based on indicator Kriging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 297-306.
- [4] 郭枫,郭相平,袁静,等. 地下水埋深对作物的影响研究现状[J]. 中国农村水利水电, 2008, (1): 63-66.
GUO F, GUO X P, YUAN J, et al. Advances in effects research of groundwater level on crop [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, (1): 63-66.
- [5] 齐引凡. 淮北平原地下水埋深对作物水分生态适应性影响研究 [D]. 合肥:安徽农业大学, 2021.
QI Y F. Research on the effect of groundwater depth on crop water ecological adaptability in Huaibei plain [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021.
- [6] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for

- monitoring vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [7] DING Y L, ZHANG H Y, ZHAO K, et al. Investigating the accuracy of vegetation index-based models for estimating the fractional vegetation cover and the effects of varying soil backgrounds using in situ measurements and the PROSAIL model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(14): 4206-4223.
- [8] BUPATHY P, SIVANPILLAI R, SAJITHVARIYAR V V, et al. Optimizing low-cost UAV aerial image mosaicing for crop growth monitoring [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2021, XLIV-M-3-2021: 7-12.
- [9] 张悦琦,李荣平,穆西哈,等. 基于多时相 GF-6 遥感影像的水稻种植面积提取[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 189-196.
ZHANG Y Q, LI R P, MU X H, et al. Extraction of paddy rice planting areas based on multi-temporal GF-6 remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 189-196.
- [10] 欧阳玲,毛德华,王宗明,等. 基于 GF-1 与 Landsat8 OLI 影像的作物种植结构与产量分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 147-156.
OUYANG L, MAO D H, WANG Z M, et al. Analysis crops planting structure and yield based on GF-1 and Landsat8 OLI images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 147-156.
- [11] JIN X M, VEKERDY Z, ZHANG Y K, et al. Soil salt content and its relationship with crops and groundwater depth in the Yinchuan plain (China) using remote sensing [J]. Arid Land Research and Management, 2012, 26(3): 227-235.
- [12] 郑倩,史海滨,李仙岳,等. 河套灌区解放闸灌域植被指数与地下水埋深的定量关系 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 301-306, 313.
ZHENG Q, SHI H B, LI X Y, et al. Study on the quantitative relationship between vegetation index and groundwater depth in Jiefangzha irrigation area in the Hetao irrigation district [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 301-306, 313.
- [13] ZHOU H H, LI W H. The effects of oasis ecosystem hydrological processes on soil salinization in the lower reaches of the Tarim River, China [J]. Ecohydrology, 2013, 6(6): 1009-1020.
- [14] MOUMANE A, EL GHAZALI F E, AL KARKOURI J, et al. Monitoring spatiotemporal variation of groundwater level and salinity under land use change using integrated field measurements, GIS, geostatistical, and remote-sensing approach: case study of the Feija aquifer, Middle Draa watershed, Moroccan Sahara [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(12): 769.
- [15] KHASANOV S, LI F D, KULMATOV R, et al. Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: as an example of Syrdarya Province, Uzbekistan [J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107444.
- [16] 齐蕊,王旭升,万力,等. 地下水和干旱指数对植被指数空间分布的联合影响:以鄂尔多斯高原为例 [J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 265-273.
QI R, WANG X S, WAN L, et al. Joint influences of groundwater and aridity index on the spatial distribution of vegetation index: a case study in the Ordos Plateau, China [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 265-273.