

# 基于植被指数研究适宜河套灌区 作物生长的地下水范围及阈值

马小茗<sup>1</sup>, 李瑞平<sup>1\*</sup>, 闫志远<sup>1</sup>, 李鑫磊<sup>1</sup>, 李正中<sup>2</sup>, 潘红梅<sup>2</sup>, 王向东<sup>3</sup>, 李玉敏<sup>3</sup>

(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.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:**【目的】探讨地下水埋深及矿化度对作物生长的影响, 分析适宜作物生长的地下水埋深和地下水矿化度范围及阈值。【方法】以河套灌区解放闸灌域为研究对象, 利用决策树分类法提取解放闸灌域的作物种植结构。采用克里金插值法对地下水埋深进行区域化插值, 对同一深度地下水对应的 *NDVI* 求取平均值并绘制曲线图; 利用采样点处地下水矿化度与其对应的 *NDVI* 绘制散点图, 综合分析得出适宜河套灌区解放闸灌域作物生长的地下水埋深范围与矿化度阈值。【结果】①研究区内玉米在拔节期、抽穗期以及灌浆期内适宜生长的地下水埋深范围分别为 1.2~1.7、1.3~1.8 m 和 1.3~1.8 m; 小麦在拔节期、抽穗期以及灌浆期内适宜生长的地下水埋深范围分别为 1.1~1.6、1.1~1.6 m 和 1.2~1.7 m; 适宜葵花现蕾期与灌浆期生长的地下水埋深范围分别为 1.1~1.6 m 和 1.2~1.7 m。②研究区内适宜作物生长的地下水矿化度阈值为 5.0 g/L;  $TDS \leq 3.0$  g/L 的地下水矿化度最适宜作物生长;  $3.0 < TDS \leq 5.0$  g/L 较适宜作物生长;  $TDS > 5.0$  g/L 基本不适宜作物生长。【结论】地下水埋深过深或过浅以及地下水矿化度过大均会限制作物生长发育, 只有适宜的地下水埋深和矿化度才有利于作物生长发育, 应通过控制灌水量及灌溉水矿化度将地下水埋深及矿化度控制在适宜作物生长的范围内, 减小地下水对作物生长的负面效应。

**关键词:** *NDVI*; 作物生长; 河套灌区; 地下水埋深; 地下水矿化度

中图分类号: S273.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022251

OSID: 

马小茗, 李瑞平, 闫志远, 等. 基于植被指数研究适宜河套灌区作物生长的地下水范围及阈值[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 6-13.

MA Xiaoming, LI Ruiping, YAN Zhiyuan, et al. Suitable Groundwater Depths for Crop Growth in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 6-13.

## 0 引言

【研究意义】由于常年的引黄灌溉, 河套灌区地下水埋深普遍较浅, 而在该地区又广泛存在着作物需水高峰期无法及时灌溉以补充作物耗水的问题, 此时地下水自然补给则成为灌溉间歇期内作物耗水的主要来源。因此, 灌区地下水变化对作物生长具有显著影响。通过分析地下水对作物生长的影响, 寻找适宜作物生长的地下水埋深及地下水矿化度范围, 可为地下水浅埋区制定灌溉制度提供参考, 对河套灌区节水改造具有重要意义。【研究进展】归一化植被指数 (*NDVI*) 是反映农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生长状况的指标,

对植被长势和生物量较为敏感, 在一定程度上代表植被覆盖度变化<sup>[1]</sup>。因此, *NDVI* 常被用来估测植被生物量和土壤含水率、监测作物长势、估算作物产量及蒸散量等<sup>[2-5]</sup>。前人利用 *NDVI* 与地下水之间的关系分析了地下水对植被生长的影响, 进而得出适宜研究区内作物生长的地下水埋深及矿化度范围。例如: 金晓媚等<sup>[6]</sup>利用 *NDVI* 计算出条件植被覆盖率, 结合地下水观测数据在区域尺度上定量研究了地下水埋深与植被生长的关系, 得出银川盆地适宜植被生长的地下水埋深范围为 2~4 m, 矿化度范围应小于 2.5 g/L; 宋鹏飞等<sup>[7]</sup>利用 *NDVI* 数据, 以同时期的气象数据和区域地下水埋深数据为基础, 利用多元统计模型对黑河流域的归一化植被指数与年平均气温、年平均地下水埋深之间进行定量分析, 得出 *NDVI* 变化趋势与气候和地下水之间的一元线性回归模型; 党学亚等<sup>[8]</sup>利用水文地质参数分析了柴达木盆地天然植被的地下水埋深及地下水矿化度的阈值分别为 5.3 m 和 7.5 g/L。在 *NDVI* 与地下水关系的研究中, 植被类型多为天然

收稿日期: 2022-05-07

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, 硕士研究生, 主要从事遥感监测农作物生长研究。E-mail: 2228416016@qq.com

通信作者: 李瑞平 (1973-), 男, 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: nmglrp@163.com

牧草类，对农作物研究较少。【切入点】已有研究表明，地下水埋深是影响河套灌区作物生长的主要因素之一<sup>[9-10]</sup>。现有研究大多在单点尺度上通过试验分析河套灌区适宜作物生长的地下水埋深，但从区域尺度上分析适宜不同作物生长的地下水埋深及地下水矿化度范围的研究较少。【拟解决的关键问题】因此，本研究将遥感数据与地下水实测数据相结合，分析适宜河套灌区作物生长的地下水埋深及地下水矿化度范围，进而提出对河套灌区具有普适性且便于宏观决策的适宜农作物生长的地下水埋深与矿化度范围和阈值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河套灌区是中国灌溉面积最大的灌区之一，位于

内蒙古自治区西部巴彦淖尔市<sup>[11]</sup>，是中国三大灌区之一。研究区域位于河套灌区西部的解放闸灌域（40°26′—41°18′N，106°34′—107°37′E），灌域控制面积  $21.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，灌溉面积  $14.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$ （其中引黄灌溉面积  $12.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，井灌面积  $1.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ）<sup>[12]</sup>，是河套灌区内重要的粮食生产基地，主要种植作物为小麦、玉米、葵花。灌域属于干旱半干旱气候区，年平均降水量 140 mm，年平均蒸发量 2 000 mm，年平均气温 7 °C，冻结期长达 180 d，无霜期较短，为 130~150 d。当地气候干旱少雨，农业发展主要依靠引黄灌溉。灌域内大多采用地面灌溉方式，排水状况不佳导致灌域内地下水埋深较浅。灌域内渠系相对健全，共设有干渠 3 条、分干渠 16 条，全长 263 km，渠系分布如图 1 所示。

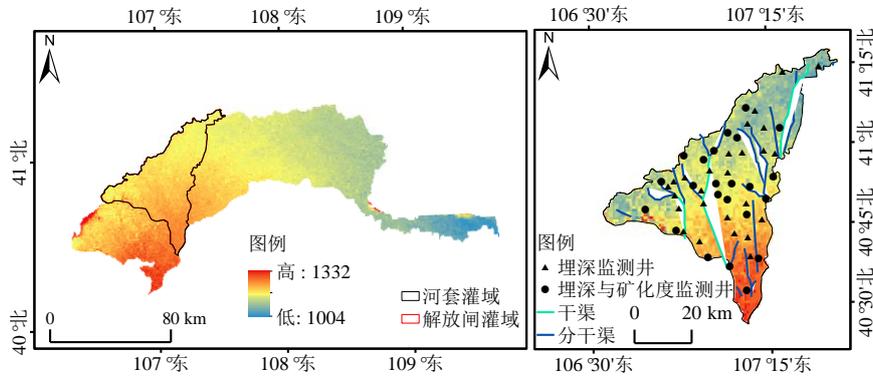


图 1 地下水观测井布设位置及渠系分布

Fig.1 Location and channel system distribution of groundwater observation Wells

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 遥感数据来源与影像预处理

采用 Landsat 系列影像数据提取归一化植被指数 (NDVI)，遥感影像数据下载于 USGS 官网 (<http://glovis.usgd.gov/>)，影像空间分辨率为 30 m，时间分辨率为 16 d。以研究区晴空或少云为原则，共筛选出覆盖作物生育期的 6 幅影像，过境时间如表 1 所示。影像数据预处理主要包括辐射定标、大气校正、镶嵌、裁剪等，Landsat ETM+ 还需进行条带修复。

表 1 影像过境和地下水埋深及矿化度监测时间

Table 1 Monitoring time of image transit and groundwater depth and salinity

序号	传感器	过境时间	地下水埋深	地下水矿化度
1	ETM+	20190515	20190516	20190516
2	OLI	20190608	20190606	
3	ETM+	20190616	20190616	
4	OLI	20190710	20190711	20190716
5	OLI	20190811	20190811	
6	ETM+	20190920	20190921	20190916

#### 1.2.2 地面实测数据

研究区地下水埋深观测值来源于灌域内长期设置的 50 眼地下水位观测井，采用绳测法观测，每隔 5 d 观测 1 次；地下水矿化度数据来源于灌域内长期

设置的 23 眼地下水位观测井，每隔 2 个月观测 1 次，点位分布如图 1 所示。地下水埋深和矿化度观测时间与卫星过境时间相同或相近为原则进行选取，具体观测时间如表 1 所示。

研究区种植结构提取需要进行野外样本点采集对后续的分类结果进行精度验证。野外样本点采集使用 GPS 于 2019 年 7 月进行采集，选取种植较为密集的区域作为地面样本点的调查区域，采样点在研究区域内分布均匀为原则进行选取，采样点空间分布如图 2 所示。采样时需详细记录各地块作物类型、长势、位置等信息。调查的 261 个样点中，小麦样点 54 个，玉米样点 81 个，葵花样点 89 个，其他作物样点 20 个，将研究区内的建筑物、水体、荒地等归为其他地物样点数为 17 个。

### 1.3 作物种植结构提取

为了更好地对农作物种植结构进行提取，本研究基于阈值法，利用决策树对研究区内地物进行分类<sup>[13-17]</sup>。根据 6 幅影像计算的 NDVI 数据构成不同地物类型的 NDVI 时序曲线如图 3 所示，通过分析 NDVI 时序曲线确定不同地物的阈值，进而提取出研究区内的种植结构。由表 2 中的灌域内主要作物生育期划分

及图 3 中的 *NDVI* 时序曲线可知, 7 月 10 日灌域内大部分作物处于生长快速期, 部分作物处于生长末期, 此时灌域内作物对应的 *NDVI* 值均大于 0.2, 故 7 月 10 日时  $NDVI < 0.2$  的地物应为建筑、水体、荒地等无植被覆盖地区; 小麦是解放闸灌域内最早播种的作物, 5 月中旬进入分蘖期且于 7 月中旬开始收割, 但 5 月中旬到 6 月中旬时玉米处于苗期, *NDVI* 较小, 故将小麦的 *NDVI* 阈值设置为  $NDVI_{5.15} > 0.2$ 、 $NDVI_{8.11} < 0.35$ 、 $NDVI_{5.15} + NDVI_{6.08} > 0.7$ ; 玉米 5 月初开始播种, 6 月中旬进入拔节期, 灌域内玉米与西葫芦生育期十分相近, 但西葫芦在 8 月中旬后, *NDVI* 值迅速减小, 而玉米的 *NDVI* 值还处于高值期, 故将玉米的 *NDVI* 阈值设定为  $NDVI_{6.16} > 0.2$ 、 $NDVI_{5.15} + NDVI_{8.11} > 1.4$ ; 葵花 5 月底 6 月初开始播种, 6 月中旬时, 灌域内其他主要作物处于生长快速期, 而葵花处于苗期, 利用 8 月 11 日与 6 月 16 日之差, 可以将葵花与其他作物区分开, 故葵花 *NDVI* 阈值设置为  $NDVI_{6.16} < 0.3$  且  $NDVI_{8.11} - NDVI_{6.16} > 0.3$ 。根据以上规则构建决策树分层分类的农作物提取模型, 具体分类规则与流程如图 4 所示。

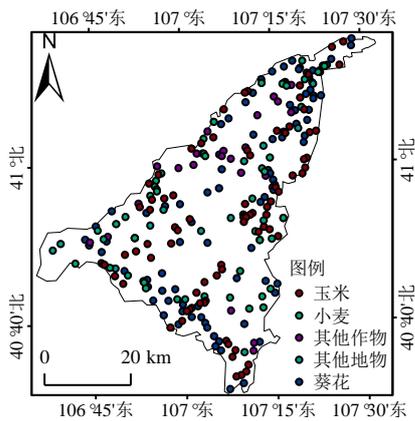


图 2 采样点空间分布

Fig.2 Spatial distribution diagram of sampling points

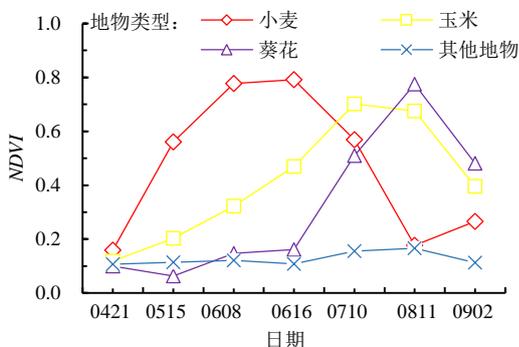


图 3 *NDVI* 时序曲线

Fig.3 *NDVI* time series curve

#### 1.4 地下水数据处理

采用克里金插值法对地下水埋深进行区域化处理<sup>[18-19]</sup>, 对地下水埋深数据重采样使其与遥感影像空间分辨率一致, 使每个像元上的地下水埋深与 *NDVI*

相对应。利用分类结果提取出小麦、玉米、葵花的矢量图, 根据提取的矢量图对处理后的影像进行裁剪, 得到 3 种作物所在区域上的数据; 再将地下水埋深以 0.1 m 为间隔, 对每一区间的 *NDVI* 求取平均值, 绘制 *NDVI* 平均值与潜水位埋深的关系曲线, 进而确定适宜作物生长的地下水埋深范围; 利用地下水矿化度 (Total Dissolved Solids, *TDS*) 采样点处像元的 *NDVI* 值与同期对应的矿化度含量绘制散点图, 得到 *NDVI* 与 *TDS* 的关系, 分析得出适宜作物生长的地下水矿化度阈值。

表 2 农作物生育期划分

小麦		玉米		葵花	
生育期	时间	生育期	时间	生育期	时间
播种—分蘖	0401—0430	播种—出苗	0501—0511	播种—苗期	0601—0705
分蘖—拔节	0501—0524	出苗—拔节	0512—0620	苗期—现蕾	0706—0724
拔节—抽穗	0525—0615	拔节—抽穗	0621—0729	现蕾—开花	0725—0806
抽穗—灌浆	0616—0630	抽穗—灌浆	0730—0819	开花—灌浆	0807—0827
灌浆—收割	0701—0720	灌浆—收割	0820—0920	灌浆—收割	0828—0920

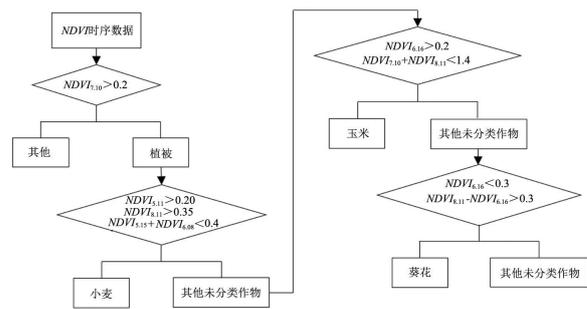


图 4 作物分类决策树

Fig.4 Decision tree of crop classification

## 2 结果与分析

### 2.1 种植结构提取及精度评价

2019 年解放闸灌域作物种植分类结果如图 5 所示。灌域内作物种植结构表现为插花分布, 种植面积最大的作物为玉米, 葵花种植面积次之, 最后为小麦。由图 5 可知, 葵花主要分布在灌域的中部和北部地区, 分布较为集中; 小麦和玉米主要分布在灌域的南部及西北部地区, 分布较为分散。

根据野外采样点数据采用混淆矩阵法对分类结果进行验证, 结果如表 3 所示。解放闸灌域作物分类的总体精度为 91.887%, *Kappa* 系数为 0.88, 分类结果较好。从用户精度和制图精度上, 小麦分类精度最好, 玉米和葵花分类精度相近。玉米和葵花由于在 7—9 月时 *NDVI* 值相差较小, 所以二者错分的情况较为突出。各类地物分类精度均较高, 由于其他作物包含类型较多, 易产生错分, 故其他作物分类精度较差。

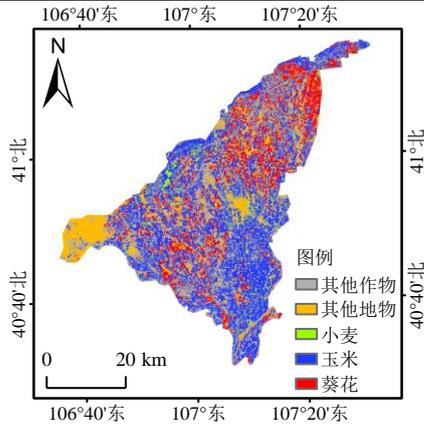


图5 解放闸灌域2019年作物分类结果

Fig.5 Crop classification results of Jiefang gate irrigation area in 2019

## 2.2 地下水埋深及矿化度时空变化趋势

利用采样点处地下水埋深进行克里金插值得到

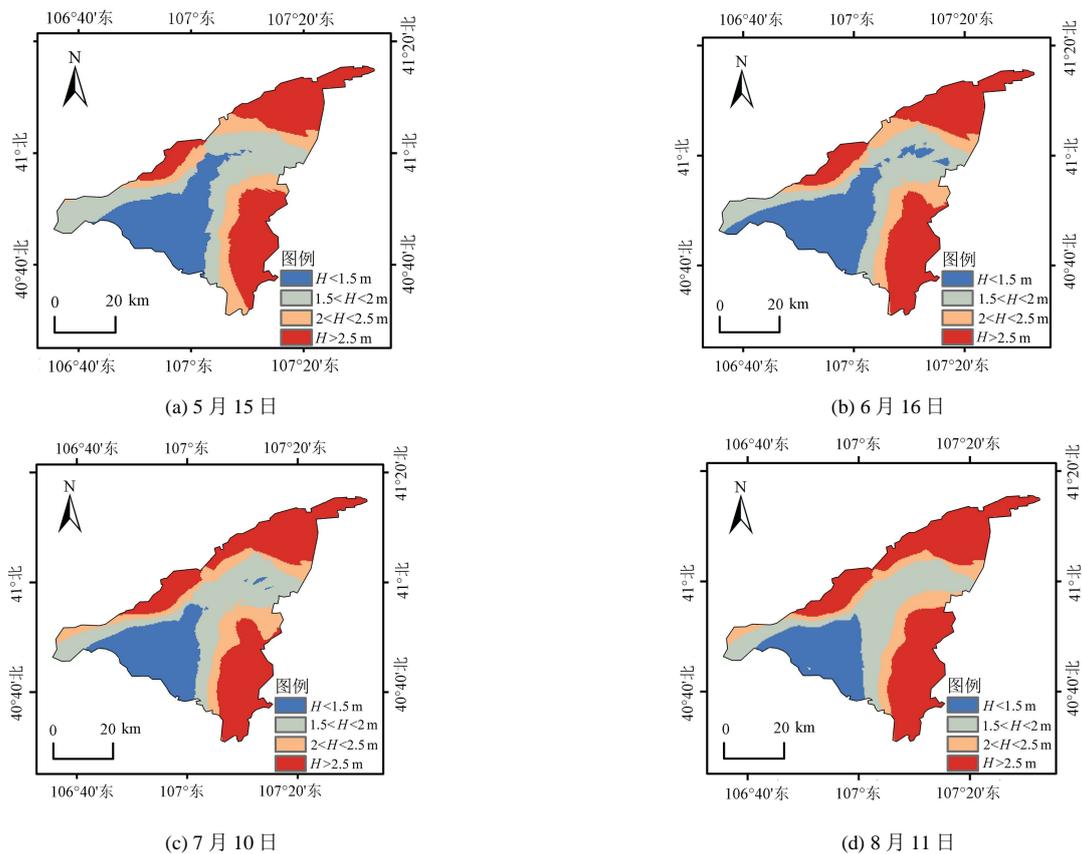


图6 地下水埋深时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of groundwater depth

利用反距离权重法对采样点处地下水矿化度进行插值得到解放闸灌域地下水矿化度空间分布特征，如图7所示。按照矿化度将地下水划分为3类：微咸水为  $1.0 \text{ g/L} < TDS < 3.0 \text{ g/L}$ 、半咸水为  $3.0 \text{ g/L} < TDS < 5.0 \text{ g/L}$ 、咸水为  $TDS > 5.0 \text{ g/L}$ 。由图7可知，5月微咸水与半咸水所占面积相近，但5—9月地下水呈现出微咸水所占面积逐渐减小、半咸水所占面积逐渐增大的趋势。

解放闸灌域地下水埋深空间分布图，如图6所示。地下水埋深按照常规标准可分为4个区<sup>[1]</sup>，在空间上整体呈北部和南部地区地下水埋深较大而灌域中部及北部地区地下水埋深较浅，且5—8月中部地区1.5~2.0 m 区间地下水埋深面积呈增大趋势。

表3 分类结果混淆矩阵

Table 3 Confusion matrix of classification results						
地物类型	小麦	玉米	葵花	其他作物	其他	合计
小麦	52	0	0	0	0	52
玉米	0	76	5	2	0	83
葵花	0	2	81	4	0	87
其他作物	2	3	3	14	2	24
其他	0	0	0	0	15	15
合计	54	81	89	20	17	261
制图精度/%	96.30	93.83	91.01	70.00	88.24	
用户精度/%	100.00	91.57	93.10	58.30	100.00	

## 2.3 NDVI 平均值与地下水埋深 (H) 关系

地下水埋深的不同会导致作物主根的下扎深度和侧根与分支根在土壤层次上的分布密度有很大差异，地下水通过影响作物根系生长，进而影响作物耗水规律、水分利用效率及作物地上部分的生长发育。利用归一化植被指数 (NDVI) 作为反应作物长势好坏的指标，选取灌域内主要作物生长快速期的地下水埋深与归一化植被指数 (NDVI) 平均值进行分析，

寻求适宜作物生长的地下水埋深范围。郑倩等<sup>[9]</sup>通过定量分析解放闸灌域 *NDVI* 与地下水埋深 ( $H$ ) 的关系得出, 当地下水埋深处在浅埋区时 ( $H < 2.5$  m), 地下水埋深 ( $H$ ) 与不同时段 *NDVI* 关系表现为负相关关系; 但当  $H > 2.5$  m 时, *NDVI* 平均值较大, 作物

长势受其他因子影响更大, 故此时 *NDVI* 平均值的增大与地下水埋深无关。综上, 本文对灌域内 3 种主要作物在不同生育期内地下水埋深小于 2.5 m 范围内的地下水埋深与 *NDVI* 平均值进行分析, 得出适宜作物生长的地下水埋深范围。

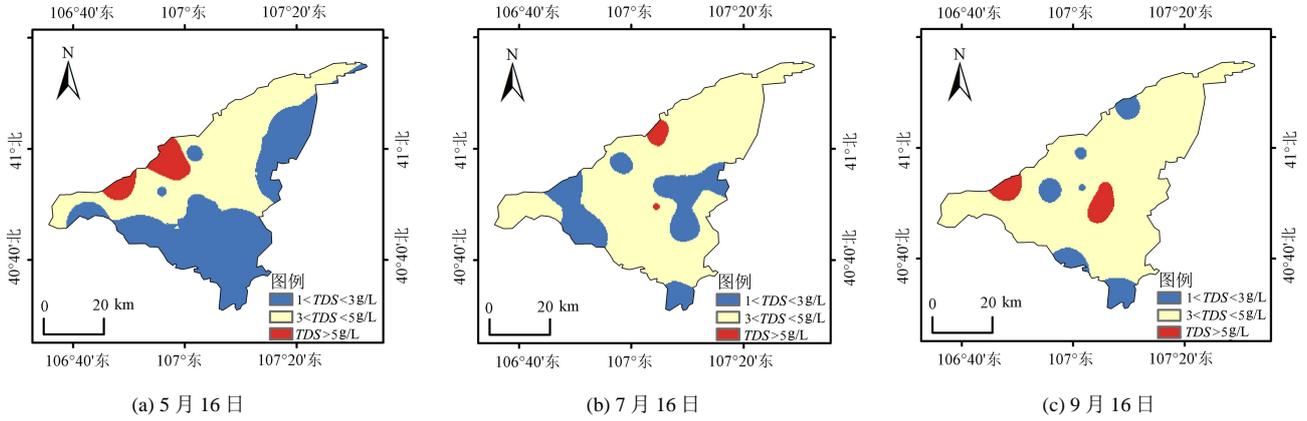


图 7 地下水矿化度时空分布特征

Fig.7 Spatial and temporal distribution characteristics of groundwater salinity

玉米与地下水埋深 ( $H$ ) 在不同生育期的关系曲线图如图 8 所示。适宜玉米在拔节期、抽穗期及灌浆期内生长的地下水埋深范围分别为 1.2~1.7、1.3~1.8、1.3~1.8 m。当地下水埋深较小时, 虽然地下水补给较多, 但地下水对作物进行向上补给时, 会造成土壤表面盐分堆积, 从而可能使作物生长受到盐分胁迫, 进

而抑制其生长; 当地下水埋深在适宜作物生长的范围内时, 地下水补给作物可利用的水量随埋深的增大而减小; 当地下水埋深大于适宜作物生长的范围时, 地下水基本不能补给或少量补给, 玉米根系难以到达和利用, 此时需要通过灌溉来补充作物生长所需水分。

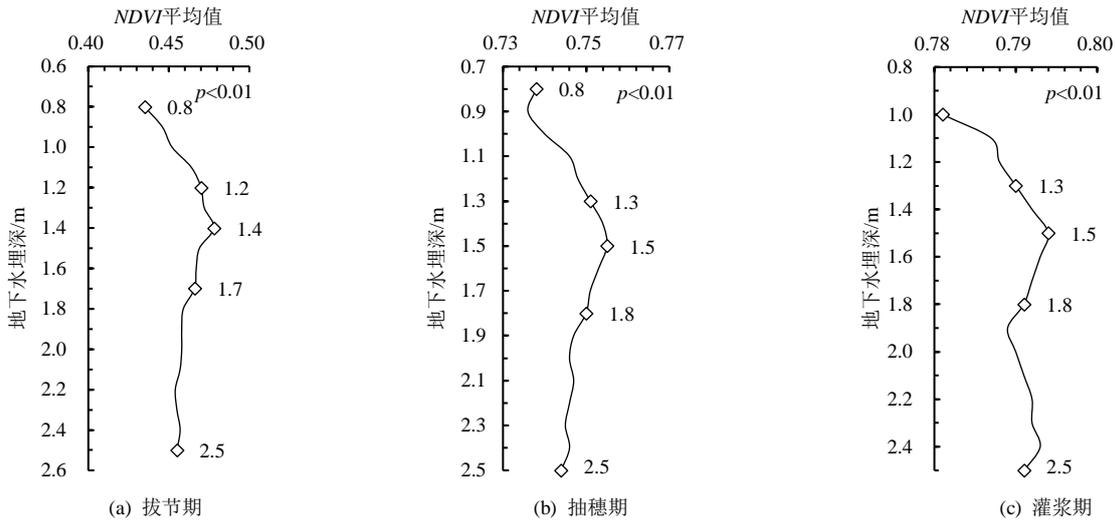


图 8 玉米不同生育期 *NDVI* 平均值与地下水埋深关系曲线

Fig.8 Curves of the relationship between *NDVI* mean and groundwater depth at different growth stages of maize

根据已有研究<sup>[20-22]</sup>, 小麦在拔节期后, 随着植株的增长、根系下扎, 抽穗期时其根系吸水层下降到 1.0~1.5 m 左右。因此, 拔节期后, 地下水埋深宜控制在 1.0~1.5 m 左右有利于小麦生长, 当地下水埋深超过此范围时, 地下水对小麦生长所需水分补给将随着地下水埋深的增大而减小, 此时除地下水外还需通过灌溉对其进行补给。根据小麦在不同生育期的地下水埋深 ( $H$ ) 与 *NDVI* 平均值关系曲线图 9 可知, 小

麦在拔节期、抽穗期以及灌浆期 3 个生育期内, 适宜其生长的地下水埋深范围分别为 1.1~1.6、1.1~1.6、1.2~1.7 m。

6—8 月葵花处于生长茁壮期, 耗水强度与蒸发作用强烈, 地下水对葵花生长有向上的水分补给。根据图 10 中葵花与地下水埋深 ( $H$ ) 在不同生育期的关系曲线图可知, 现蕾期地下水埋深在 1.1~1.6 m 范围内、灌浆期地下水埋深在 1.2~1.7 m 范围内时, *NDVI* 平均

值出现峰谷, *NDVI* 平均值较大。因此, 现蕾期与灌浆期适宜生长的地下水埋深范围分别为 1.1~1.6 m 和 1.2~1.7 m。

#### 2.4 *NDVI* 与 *TDS* 量之间的关系

地下水通过土壤毛细管上升到表层蒸发, 地下水中的盐分则被留在土壤表层造成土壤盐碱化, 在地下水位相近的条件下, 地下水矿化度越高则土壤积盐越

严重。由图 11 可知, *NDVI* 的密集度随着矿化度的增加而减少。当  $TDS \leq 3.0$  g/L 时, 散点密集且 *NDVI* 高值点密度大, 作物生长发育最好; 当  $3.0 < TDS \leq 5.0$  g/L 时, 散点密度及高值点明显减少, 作物生长发育较好; 当  $TDS > 5.0$  g/L 时, 散点稀疏且无高值点, 植被生长较差。

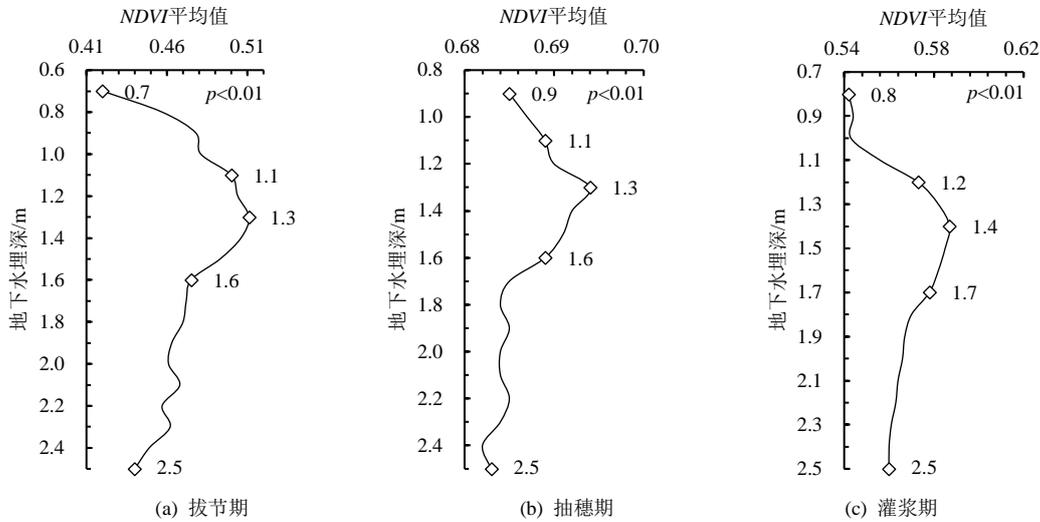


图 9 小麦不同生育期 *NDVI* 平均值与地下水埋深关系曲线

Fig.9 Curves of the relationship between *NDVI* mean and groundwater depth at different growth stages of wheat

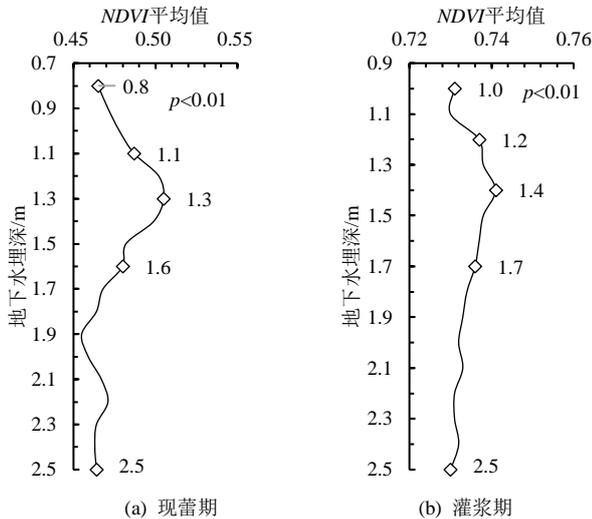


图 10 葵花不同 *NDVI* 平均值与地下水埋深关系曲线

Fig.10 Curves of the relationship between *NDVI* mean and groundwater depth at different growth stages of sunflower

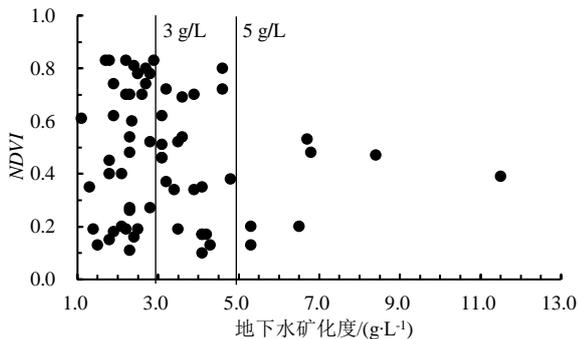


图 11 *TDS* 与 *NDVI* 散点分布

Fig.11 Scatter distribution of *TDS* and *NDVI*

### 3 讨论

河套灌区由于常年对作物种植区域进行引黄灌溉, 导致该地区地下水埋深较浅, 因此地下水的变化对作物的生长发育是不可忽视的, 故应将地下水埋深控制在适宜作物生长的范围将更有利于作物的生长发育。为寻求适宜河套灌区作物生长的地下水环境, 本文利用遥感影像数据与区域化地下水埋深数据相结合, 从区域上统计分析适宜作物生长的地下水埋深和地下水矿化度的范围及阈值。分析表明在本研究所选地下水埋深范围内, *NDVI* 平均值与地下水埋深之间呈 *NDVI* 平均值先随着地下水埋深的增大而增大, 但当地下水埋深增大到一定程度时 *NDVI* 平均值与地下水埋深之间的曲线又趋于平缓, 而当地下水埋深继续增加时, 此时又呈 *NDVI* 平均值随地下水埋深的增大而减小的趋势, 出现这种现象主要是因为地下水埋深过深或过浅都会限制作物的生长发育, 只有适宜的地下水埋深才会有利于作物的生长发育。研究区内地下水矿化度的高低同样影响着作物的生长发育, 由图 11 可知, 作物的生长发育随着地下水矿化度的增加而受到抑制,  $TDS > 5.0$  g/L 的区域几乎无作物生长, 表明此区域地下水矿化度极不适宜作物生长, 因此, 认定研究区内适宜作物生长的地下水矿化度阈值为 5.0 g/L。

已有研究多为对典型灌区、地区从地下水埋深对

作物产量、产量构成因素及水分生产效率等方面,给出适宜该地区条件的最适宜作物生长的地下水埋深范围,本研究通过利用归一化植被指数(*NDVI*)反应作物长势进而确定适宜作物生长的地下水范围及阈值,可以更好地从宏观层面给出适宜河套灌区作物生长的地下水埋深及地下水矿化度范围。前人通过试验对河套灌区适宜作物生长的地下水埋深范围进行分析,如张义强等<sup>[20]</sup>通过对河套灌区主要作物小麦、玉米、葵花的野外试验研究,得出小麦、玉米生育期适宜的地下水埋深范围在1.5~2.0 m,葵花生育期的适宜地下水埋深在2.0~2.5 m;常春龙等<sup>[21]</sup>从地下水埋深与盐分关系入手得出小麦生育期内适宜小麦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;由于河套灌区包含5个灌域,跨度较大,且每个灌域的灌水情况、土壤环境情况均不相同,导致河套灌区整体情况较为复杂,因此本研究结果与已有研究结果存在一定差异。

作物的生长发育受到诸多因素的影响,从区域上分析地下水埋深对作物生长影响时,忽略了品种、灌溉、排水施肥等农业管理因素对作物生长的影响;同时河套灌区土壤盐渍化严重,其对作物生长的影响也是不可忽视的。本文在利用遥感影像从区域上对适宜作物生长的地下水埋深范围及矿化度阈值进行分析时,仅考虑了地下水对*NDVI*的影响,忽略了农业管理因素、土壤水分和盐分等对作物生长的影响。因此,在后续研究中还应考虑农业管理因素、土壤水分和盐分对作物生长的影响,进一步确定适宜作物生长的地下水埋深和地下水矿化度的范围及阈值。

## 4 结论

1) 研究区内玉米在拔节期、抽穗期及灌浆期内其适宜生长的地下水埋深范围分别为1.2~1.7、1.3~1.8、1.3~1.8 m;小麦在拔节期、抽穗期以及灌浆期3个生育期内,适宜生长的地下水埋深范围分别为1.1~1.6、1.1~1.6、1.2~1.7 m;葵花在现蕾期与灌浆期内适宜生长的地下水埋深范围分别为1.1~1.6、1.2~1.7 m。

2) 解放闸灌域内作物生长的地下水矿化度阈值为5.0 g/L。 $TDS \leq 3.0$  g/L时,适宜作物生长; $3.0 < TDS \leq 5.0$  g/L时,较适宜作物生长; $TDS > 5.0$  g/L时,基本不适宜作物生长。

### 参考文献:

- [1] TUCKER C. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [2] 丁建丽, 陈文倩, 王璐. HYDRUS模型与遥感集合卡尔曼滤波同化提高土壤水分监测精度[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 166-172.
- [3] 黄青, 李丹丹, 陈仲新, 等. 基于MODIS数据的冬小麦种植面积快速提取与长势监测[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 163-167.
- [4] HUANG Qing, LI Dandan, CHEN Zhongxin, et al. Rapid extraction and growth monitoring of winter wheat planting area based on MODIS data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 163-167.
- [4] LI Wenjie, HUANG Jingfeng, YANG Lingbo, et al. A practical remote sensing monitoring framework for late frost damage in wine grapes using multi-source satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3 231.
- [5] 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, 316.
- [5] OUYANG Ling, MAO Dehua, WANG Zongming, et al. Analysis of crop 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, 316.
- [6] 金晓媚, 万力, 薛忠歧, 等. 基于遥感方法的银川盆地植被发育与地下水关系研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008(1): 129-132.
- [6] JIN Xiaomei, WAN Li, XUE Zhongqi, et al. Study on the relationship between vegetation development and groundwater in Yinchuan Basin based on remote sensing method[J]. *Arid Land Resources and Environment*, 2008(1): 129-132.
- [7] 宋鹏飞, 白利平, 王国强, 等. 黑河流域地下水埋深与气候变化对植被覆盖的影响研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(5): 549-554.
- [7] SONG Pengfei, BAI Liping, WANG Guoqiang, et al. Effects of groundwater depth and climate change on vegetation cover in Heihe River Basin[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, 50(5): 549-554.
- [8] 党学亚, 卢娜, 顾小凡, 等. 柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 1-8.
- [8] DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(3): 1-8.
- [9] 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.
- [9] ZHENG Qian, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Quantitative relationship between vegetation index and groundwater depth in Jiefangzha irrigation area of Hetao irrigation Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 301-306, 313.
- [10] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 57-64.
- [10] DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Effects of irrigation, fertilization and buried depth of shallow water on Wheat Yield and Nitrate leaching loss[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 57-64.
- [11] 吴锦贵. 中国农业百科全书·水利卷上[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 271-272.
- [11] WU Jingui. *Encyclopedia of Chinese Agriculture, Water Conservancy Volume*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 271-272.
- [12] 郝远远. 内蒙古河套灌区水文过程模拟与作物水分生产率评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [12] HAO Yuanyuan. *Hydrological process simulation and crop water productivity assessment in Hetao irrigation area of Inner Mongolia*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [13] 袁玉娟, 尹云鹤, 戴尔阜, 等. 基于阈值分割的黑龙省森林类型遥感识别[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 655-663.
- [13] YUAN Yujuan, YIN Yunhe, DAI Erfu, et al. Remote sensing

- recognition of forest types in heilongjiang province based on threshold segmentation[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 655-663.
- [14] 黄青, 唐华俊, 周清波, 等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 218-223, 386.  
HUANG Qing, TANG Huajun, ZHOU Qingbo, et al. Remote sensing extraction and growth monitoring of main crops in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 218-223, 386.
- [15] 周思, 何祺胜, 刘宝柱. 基于 MODIS 的黑龙省农作物种植结构提取研究[J]. *地理空间信息*, 2018, 16(1): 79-82, 8-9.  
ZHOU Si, HE Qisheng, LIU Baozhu. Study on extraction of crop planting structure based on MODIS in Heilongjiang province[J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(1): 79-82, 8-9.
- [16] MA Pea, BRENNING A. Assessing fruit-tree crop classification from Landsat-8 time series for the Maipo Valley, Chile[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 234-244.
- [17] 李恒凯, 吴娇, 王秀丽. 基于 GF-1 影像的东江流域面向对象土地利用分类[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 245-252.  
LI Hengkai, WU Jiao, WANG Xiuli. Land use classification based on GF-1 image in Dongjiang River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 245-252.
- [18] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS Spatial Analysis Experiment Tutorial[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [19] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.  
WANG Renduo, HU Guangdao. Linear geostatistics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [20] 张义强, 白巧燕, 王会永. 河套灌区地下水适宜埋深、节水阈值、水盐平衡探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(S2): 83-86.  
ZHANG Yiqiang, BAI Qiaoyan, WANG Huiyong. Study on suitable groundwater depth, water-saving threshold and water-salt balance in Hetao Irrigation Area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(S2): 83-86.
- [21] 常春龙. 河套灌区农田生态地下水埋深及不同种植模式作物最适灌水量研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.  
CHANG Chunlong. Study on groundwater depth and optimal irrigation amount of crops in different planting modes in Hetao Irrigation area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [22] 武朝宝. 地下水埋深对作物产量与水分利用效率的影响及作物系数变化[J]. *地下水*, 2011, 33(4): 20-23.  
WU Chaobao. Effects of groundwater depth on crop yield and water use efficiency and crop coefficient change[J]. *Groundwater*, 2011, 33(4): 20-23.

## Suitable Groundwater Depths for Crop Growth in Hetao Irrigation District

MA Xiaoming<sup>1</sup>, LI Ruiping<sup>1\*</sup>, YAN Zhiyuan<sup>1</sup>, LI Xinlei<sup>1</sup>, LI Zhengzhong<sup>2</sup>,  
PAN Hongmei<sup>2</sup>, WANG Xiangdong<sup>3</sup>, LI Yumin<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018, China; 2. Shahao Canal Test Station, Jiefangzha Sub-center,

Water Conservancy Development Center of Hetao Irrigation District, Bayannur 015000, China;

3. Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development Center Jiefangzha Sub-center, Bayannur 015000, China)

**Abstract:** 【Objective】Hetao irrigation district is one of the largest surface water-irrigation districts in north China. Keeping groundwater table below a critical depth is essential to preventing salt accumulation in the root zone, and the purpose of this paper is to study the suitable groundwater depth for healthy growth of different crops. 【Method】The experimental area is at Jiefangzha within the irrigation district. Planting structure in the area was analyzed using decision tree classification method, and groundwater depth was estimated using the Kriging interpolation method, from which we calculated the mean *NDVI*. The suitable groundwater depth and salinity threshold for crops at different locations were obtained from the scatter diagram of groundwater salinity and its *NDVI*. 【Result】①The suitable groundwater depth for maize at its jointing, heading and filling stages was 1.2~1.7, 1.3~1.8 m and 1.3~1.8 m, respectively, while for winter wheat, the suitable groundwater depth at its jointing, heading and filling stages was 1.1~1.6, 1.1~1.6 m and 1.2~1.7 m, respectively. The suitable groundwater depth for sunflower at its bud and filling stages was 1.1~1.6 m and 1.2~1.7 m, respectively. ②The groundwater salinity critical for crop growth is 5 g/L, with groundwater salinity in the range of  $TDS \leq 3$  g/L,  $3 < TDS \leq 5$  g/L and  $TDS > 5$  g/L being most suitable, suitable and not suitable for crop growth, respectively. 【Conclusion】Controlling groundwater table at suitable depths with groundwater salinity not exceeding the critical concentration is essential to improving groundwater use efficiency and sustaining crop production in Hetao Irrigation district. For the area we studied, the suitable groundwater depth varies with crops and their growth stages, but the critical groundwater salinity is approximately the same for all crops.

**Key words:** *NDVI*; crop growth; Hetao Irrigation area; groundwater depth; groundwater salinity

责任编辑: 韩 洋