

河套灌区解放闸灌域植被指数与地下水埋深的定量关系

郑倩¹, 史海滨¹, 李仙岳¹, 刘美含¹, 孙伟¹, 王国帅¹, 张勇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.内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗三排干管理所, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要: 干旱荒漠地区地下水补给是地表植被水分消耗的主要补给源, 地下水埋深与植被指数(NDVI)关系密切。针对植被指数与地下水埋深响应关系研究的不足, 分析了基于河套灌区解放闸灌域植被指数(NDVI)与地下水埋深(H)的定量关系。采用 2016 年 3—9 月的 10 个时相的 landsat8 遥感影像数据与同时期的 57 眼地下水埋深观测数据, 经 NDVI 遥感提取与地下水埋深(H)的地统计分析, 建立 NDVI 与 H 的时空相关关系, 并做显著性检验与密切程度的划分, 进一步分析不同地下水埋深分区下 H 与 NDVI 的关系。结果表明: NDVI 与地下水埋深(H)存在显著线性关系, 二者的密切程度以中度和高度相关为主, 负相关区域在地下水浅埋区居多, 正相关区域在地下水深埋区居多。从空间上看, 具有统计学意义的线性关系约占灌域总面积的 40%。当 $H \leq 2.5$ m 时, 不同的埋深分区对灌域的 NDVI 均值的影响为埋深(H)越小, NDVI 均值越大, 呈负相关关系变化; 当 $H > 2.5$ m 时, NDVI 均值较大, 地下水不再对作物生长进行水分补给, 此时 NDVI 均值的增大与埋深(H)分区的变化关系不大。从空间上进行 NDVI 与地下水埋深(H)的点对点的相关性分析, 增强了二者相关性的空间可视性, 为灌区灌溉管理提供理论支撑, 有助于节水增产措施的深入规划与落实。

关键词: NDVI; 地下水埋深; 定量关系; 遥感技术; 河套灌区

中图分类号: S273.4; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0301-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.043

Study on the Quantitative Relationship Between Vegetation Index and Groundwater Depth in Jiefangzha Irrigation Area in the Hetao Irrigation District

ZHENG Qian¹, SHI Haibin¹, LI Xian Yue¹, LIU Meihan¹,

SUN Wei¹, WANG Guoshuai¹, ZHANG Yong²

(1.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot 010018; 2.Sanpaigan Management Office, Jiefangzha

Management Bureau of Hetao Irrigation District, Bayannaoer, Inner Mongolia 015000)

Abstract: Groundwater recharge is the main source of water replenishment of surface vegetation in the arid desert areas, and the depth of groundwater is closely related to the vegetation index NDVI. In view of the shortcomings of the research on the relationship between NDVI and groundwater depth change, this paper carried out a quantitative relationship between NDVI and groundwater depth (H) based on the Jiefangzha irrigation area in the Hetao Irrigation District. Using ten landsat8 remote sensing image data from March 2016 to the end of September 2016 and 57 groundwater observation data in the same period, the spatial and temporal dynamics of NDVI and groundwater depth (H) were obtained by geostatistical analysis. On this basis, the spatial and temporal correlation between NDVI and H was established through ArcGIS, and the significance test and the degree of closeness were divided. The quantitative relationship between H and NDVI in different groundwater depth zones was further analyzed. It was concluded that there was a significant linear relationship between NDVI and H . The close degree of NDVI and H was mainly moderate and high correlation. The negative correlation area was concentrated in the shallow groundwater area, and the positive corre-

收稿日期: 2020-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(51539005, 51769024)

第一作者: 郑倩(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事区域农田水土平衡研究。E-mail: ZZhengQian@yeah.net

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉与新技术研究。E-mail: shi_haibin@sohu.com

lation area was concentrated in the deep groundwater area. In terms of space, the linear relationship with statistical significance accounted for about 40% of the total irrigation area. When $H \leq 2.5$ m, the influence of different groundwater depth zones on NDVI mean value showed a negative correlation change; while when $H > 2.5$ m, the mean value of NDVI was larger, and the groundwater did not supply water for crop growth. Therefore, the increase of NDVI mean value had little relationship with the change of H division. Carrying out the point-to-point correlation analysis of NDVI and H in space could enhance the spatial visibility of the correlation between the two, provide theoretical support for irrigation management in irrigation districts, and contribute to the in-depth planning and implementation of water-saving and production-increasing measures.

Keywords: NDVI; groundwater depth; quantitative relationship; Remote Sensing Technology; the Hetao Irrigation District

植被与农田水土环境是自然界重要组成部分,植被生长旺盛与否既代表生态环境的质量又标志作物产能。农田水土环境中在一些地下水埋深较浅的地区,地下水埋深的变化对作物生长具有显著影响,如刘战东等^[1]在江淮丘陵区研究了夏玉米生长指标与地下水埋深的关系表明,地下水埋深的变化对夏玉米叶面积指数与茎粗的响应关系明显,当埋深为0.4 m时,夏玉米叶面积指数与茎粗最大。Johansen 等^[2]通过测量和调查地下水水位动态变化与植物物种证明,地下水水位的变化是影响湿地物种多样性的重要限制因素。杜军等^[3]在河套灌区研究了灌溉、施肥、浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响,结果表明,浅水埋深对春小麦产量影响程度高于灌溉和施肥。因此研究作物与地下水埋深的响应关系对提高作物长势、水资源的有效管理很有意义。

作物归一化植被指数 NDVI 可以表征作物长势,目前,国内外对 NDVI 的研究大部分集中在多年 NDVI 时空变化及其驱动因素研究,驱动因素多集中在气候因子如降水、气温等^[4-10],少数集中在人类活动如放牧、退耕还林、工业园区建设等政策实施^[11],极少数考虑地形因子如坡度、高程对植被覆盖的影响^[12-13];少部分学者^[14-16]利用 NDVI 估算作物产量等;在对植被 NDVI 与土壤水盐、地下水埋深的定量关系研究如 Yousef^[17]利用枣椰树 NDVI 植被覆盖度评估土壤盐渍化程度与灌溉水水质。Wang 等^[18]分析了不同土壤根区的土壤水分与 NDVI 的相关关系发现,湿润地区 NDVI 对土壤水分变化的响应时间(10 天)比半干旱地区长(5 天或更短)。金晓媚等^[19]对银川平原土壤盐渍化与植被和地下水的关系进行了定量研究。段浩等^[20]建立地下水模型确定了地下水浅埋区适宜植被生长的地下水埋深范围。马玉蕾等^[21]研究了黄河三角洲区域典型植被(翅碱蓬—怪柳、刺槐、芦苇和棉花)、地下水埋深、土壤盐分之间的关系,结果表明,三者互馈关系显著。在对 NDVI 与地下水埋深关系的研究中,植被类型大多为天然牧草类,对农业种植区农作

物种类涉及较少,并且研究区多集中在荒漠区绿洲、黄河三角洲等地带,同时在说明 NDVI 与地下水埋深的定量关系时没有从空间布局的角度来分析二者的定量关系,并且在干旱半干旱灌区作物种植情况较复杂条件下 NDVI 与地下水埋深的定量关系研究也尚未见报道,所以开展农区 NDVI 与地下水埋深的定量关系研究具有一定意义。

内蒙古河套灌区地处干旱半干旱区,是国家主要粮油生产基地,灌区主要农作物有玉米、葵花、小麦等。灌区作物为插花斑状分布,NDVI 属典型的农区作物 NDVI 分布特征,变化较为复杂。河套灌区属于干旱荒漠绿洲,地下水补给对于区域植被与农作物至关重要。灌区多年来一直致力于节水改造,节水改造后,灌区的地下水位区域分布变化显著。掌握当前地下水埋深与 NDVI 的定量关系具有重要意义。本文以 NDVI 与地下水埋深(H)的地统计分析为基础开展区域尺度 NDVI 与地下水埋深(H)的定量关系研究,可为灌区灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区是亚洲最大的一首制灌区,也是盐渍化程度较严重的灌区。本文选择灌区内较典型的解放闸灌域(40°26′—41°18′N,106°34′—107°37′E)为研究区域(图 1)。解放闸灌域气候属中温带大陆性干旱季风气候,光照充足,风多雨少,气候干燥,夏季炎热而短,冬季寒冷而长,昼夜温差大,明显表现为蒸发强烈,降雨稀少的特点。灌域年平均降水量 138.2 mm,年平均蒸发量为 2 096.4 mm。灌域主要以引黄河水进行灌溉,灌域内具有明确的灌溉与排水系统,渠道几乎为人工开挖而成,灌水同排水各成一系而又密不可分,构成了灌域水量有灌有排的平衡体系。灌域自然坡降 1/8 000。

1.2 植被指数(NDVI)的获取与地下水埋深(H)的观测

灌域 NDVI 通过 landsat8 OLI 卫星数据提取,

landsat8 OLI 卫星数据精度为 30 m,遥感影像的时相选择为 2016 年 3 月 11 日,4 月 12 日,4 月 28 日,5 月 14 日,5 月 30 日,6 月 15 日,7 月 1 日,8 月 2 日,8 月 26 日,9 月 19 日的 10 个时相。选择原则为云量少、时相多、分辨率尽可能高。研究区地下水埋深(H)观测值来源于灌域长期设置的 57 眼地下水位观测井,见图 1,其中有 9 眼属井灌区。地下水埋深观测频率为每 5 天观测 1 次,采用绳测法,地下水埋深(H)的观测资料时相选择与卫星数据时相相对应或接近,分别为 2016 年 3 月 11 日,4 月 11 日,4 月 26 日,5 月 16 日,6 月 1 日,6 月 16 日,7 月 1 日,8 月 1 日,8 月 26 日,9 月 21 日。

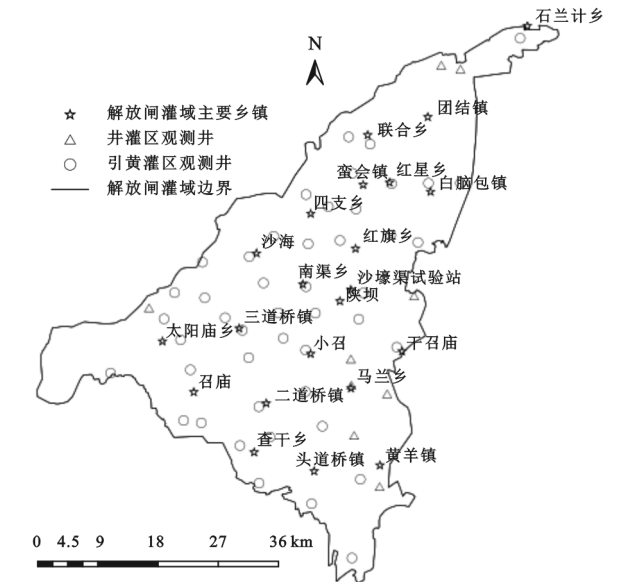


图 1 解放闸灌域地下水观测井布设位置

1.3 数据分析方法

1.3.1 克里金插值法 克里金插值法又称空间局部插值法^[22-23],是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。其基本原理是根据相邻变量的值,利用变异函数揭示的区域化变量的内在联系来估计空间变量数值。克里金法分为 2 步:第 1 步是对已知点进行结构分析,也就是说在充分了解已知点性质的前提下,构造变异函数模型;第 2 步是在变异函数模型的基础上进行克里金区域估值,该方法在 GS+9.0 与 ARC GIS10.5 中完成。

1.3.2 相关系数法 相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: r 为相关系数; n 为研究时段数; x_i 为某时相地下水埋深(H); $\bar{x}$ 为研究时段内地下水埋深(H)均值; y_i 为某时相 NDVI 值; $\bar{y}$ 为研究时间段 NDVI 均值。

本文中的相关系数计算过程在 ARC GIS 的栅格

计算器中完成。

1.3.3 t 检验 显著性检验是为了说明样本是否能代表总体的一个方法,本文在对 NDVI 与地下水埋深(H)的相关性分析时采用 t 检验方法来确定二者是否具有显著相关关系,计算公式为:

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

式中: r 为相关系数; N 为研究时段数;

2 结果与分析

2.1 植被指数(NDVI)与地下水埋深(H)时空相关关系的建立与分析

本文主旨在建立 NDVI 与地下水埋深(H)的定量关系,通常的研究手段多以经典统计学方法对 NDVI 的时间序列与相应地下水埋深(H)的时间序列进行相关性分析,缺乏二者空间定量关系的可视性,因此,本文在地统计学方法的基础上建立 NDVI 与地下水埋深(H)的相关性分析,既满足了经典统计学方法中对变量时间序列的分析要求,同时又能直观地显示 NDVI 与地下水埋深(H)在空间地域存在的定量关系,增加了 NDVI 与地下水埋深(H)定量关系的可视性。

2.1.1 NDVI 与地下水埋深(H)的地统计分布特征 图 2 为解放闸灌域 2016 年 3—9 月 10 个时相的植被指数(NDVI)空间分布图,因灌域属农业种植区,主要的种植作物为玉米、葵花、小麦,根据对灌域 2016 年农作物遥感分类经验,将 NDVI 按作物生长变化分为 4 个区,作物低长势区域($0.18 \leq \text{NDVI} \leq 0.26$),作物中长势区域($0.26 < \text{NDVI} \leq 0.57$),作物高长势区域($0.57 < \text{NDVI} \leq 1$),非作物生长区($\text{NDVI} < 0.18$)。

3 月 11 日至 5 月 14 日,灌域除小麦生长快速之外,大部分作物处于种植期一苗期,将该时段划分为种植初期,5 月 30 日至 7 月 1 日以小麦的快速生长为主,划分为小麦快速生长期,8 月 2 日至 8 月 26 日,葵花、玉米生长迅速,处于生长旺盛期,将该时段划分为玉米葵花生长旺盛期,9 月 19 日灌域所有作物均已成熟,部分完成收割,玉米、葵花待收割,处于种植末期。灌域 NDVI 分区的面积变化结果见表 1。

由表 1 可知,非作物生长区面积由 99.0%减小至 5.8%后开始增大,种植末期增大至 11.3%,增大的部分考虑为因作物收割增加的裸地面积;作物低长势区的变化呈波动性发展,由种植初期的 0.90%逐渐增大,在小麦快速生长前期达到最大,为 19.4%,因为此时灌域除小麦以外,大部分作物相继种植出苗,扩大了作物低长势区面积所致,随后随着玉米、葵花、瓜类的持续增长,NDVI 值增大,进入了作物中长势区范围,作物低长势区面积逐渐减小至 4.5%,种植末期,作物低长势区

面积微弱增大,考虑主要以瓜类残留枝叶为主;作物中长势区同作物低长势区变化规律一致,但峰值点出现的时间稍有不同,作物中长势区最大面积出现在种植末期,为 59.1%;作物高长势区由种植初期的零值

逐渐增大至玉米葵花生长旺盛期的峰值,为 64.3%,玉米与葵花的生长是灌域作物高长势区的主要贡献力量,种植末期,灌域所有作物成熟,生长停止,作物高长势区 NDVI 值迅速减小,面积减小至 19.5%。

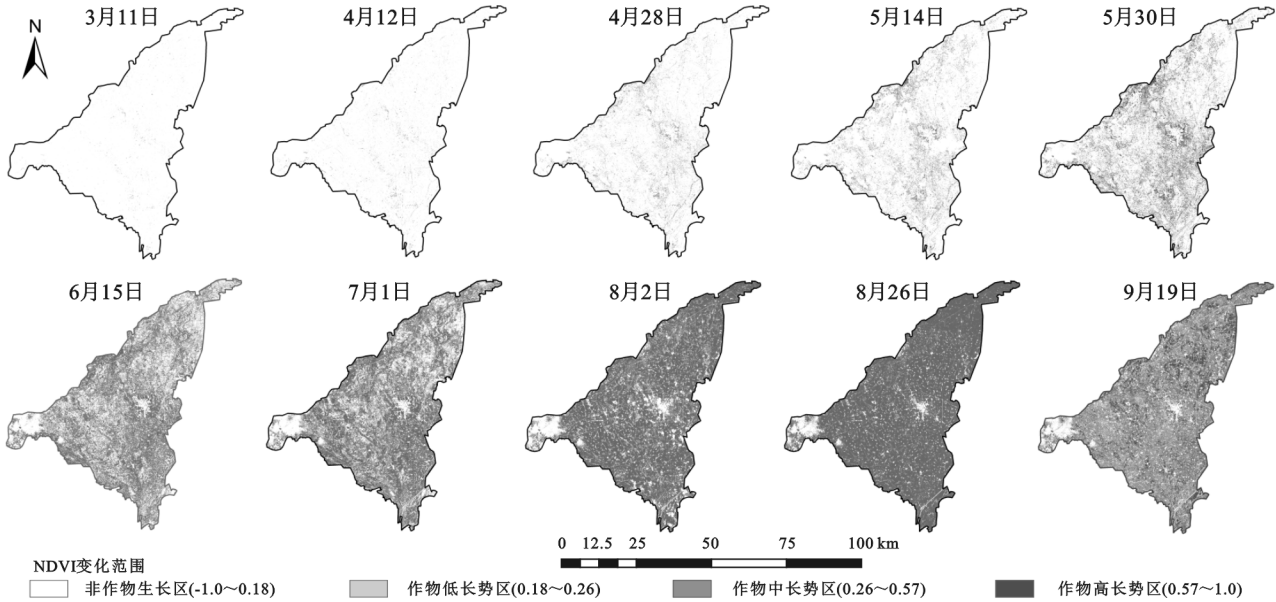


图 2 解放闸灌域 2016 年 3—9 月 NDVI 动态变化过程

表 1 不同种植期的 NDVI 分区面积变化

NDVI 分区	种植初期	小麦快速生长期	玉米葵花生长旺盛期	种植末期
非作物生长区	99.0~82.3	63.8~19.3	9.8~5.8	11.3
作物低长势区	0.9~9.0	19.4~13.0	5.9~4.5	10.1
作物中长势区	0.10~8.1	14.7~40.1	29.1~25.5	59.1
作物高长势区	0~0.6	2.1~27.6	55.3~64.3	19.5

注:表中数据为作物种植生长期 NDVI 分区面积变化,其中面积以占灌域总面积的百分比(%)表示;种植初期以 3 月 11 日至 5 月 14 日为代表;小麦快速生长期以 5 月 30 日至 7 月 1 日为代表;玉米葵花生长旺盛期以 8 月 2 日至 8 月 26 日为代表;种植末期以 9 月 19 日为代表。

图 3 为地下水埋深(H)的克里格空间插值重分类结果,时相与 NDVI 相对应。由图 3 可知,灌域的地下水埋深(H)的空间分布特点为西浅东深,其中井灌区埋深较大,引黄灌溉区埋深较浅。图 3 中地下水埋深(H)按常规分类^[24]分为 4 个区,分别为 H1 级区($H\leq 1.5\text{ m}$),H2 级区($1.5\text{ m}<H\leq 2.0\text{ m}$),H3 级区($2.0\text{ m}<H\leq 2.5\text{ m}$),H4 级区($H>2.5\text{ m}$),其中,H4 级区包含井灌区。各个分区在研究时段的变化特征主要受冻融期(3 月 11 日,4 月 11 日)消融水与灌溉期(4 月 26 日,5 月 16 日,6 月 16 日,7 月 1 日,8 月 1 日,9 月 21 日)灌溉水对地下水的补给影响。

表 2 为地下水埋深各个分区面积在研究时段的变化过程,3 月 11 日,H1 级区面积最小,为 3.3%,4 月 11 日,受冻土消融水对地下水的补给,埋深变浅,H1 级区~H2 级区明显增大,H3 级区~H4 级区变小,H4 级区显著减小至 40.1%。4 月 26 日前后,灌域进入灌溉期,地下水受灌域乌拉河分干渠下游段、杨家河分干渠中、下游段、黄济渠二闸段下游的灌溉水补给,H1 级区增加明显,为 19.7%,其余各分区面积变化不大。5 月 16 日,灌溉持续,H1 级区增大至

46.3%,H3 级区~H4 级区减小明显。6 月 1 日,灌域大范围处于灌后 1 周,灌水渗漏量最大,H1 级区达到峰值,为 51.5%,H2 级区~H4 级区成为整个研究时段最小范围,分别为 14.5%,12.2%,21.8%。

6 月 1 日以后,灌域典型作物葵花和玉米(占所有作物面积 80%)开始生长发育,耗水量较大,此时,地下水成了作物生长耗水的主要动力(灌溉水不足时)。6 月 1 日至 8 月 1 日,耗水项增加,蒸发作用强烈,地下水开始大量补给上层土壤,H1 级区因蒸发和作物耗水减小明显,减至 27.1%,H2 级区~H4 级区逐渐增大,分别增大至 26.4%,15.5%,31.0%。8 月 26 日,H1 级区面积有所增大,为 38.6%,考虑增大原因为 8 月 18 日灌溉水与 8 月 22 日的强降雨滞后效应所致,H2 级区~H4 级区呈减小趋势。9 月 21 日,休灌后,地下水位因无渗漏补给和持续的蒸发作用而下降明显,H1 级区减小至 12.4%,H2 级区变化不大,H3~H4 级区明显增大,分别为 26.8%,39.2%。

2.1.2 NDVI 与地下水埋深(H)的空间显著相关性
及二者密切程度分析 将上文的 NDVI 与地下水埋深(H)的地统计分析结果叠加进行相关性分析与 t 检验分

析。由图 4 可知,通过相关关系分析,NDVI 与地下水埋深(H)存在着显著的线性关系,并且二者的密切程度不同。从空间上看,具有统计学意义的线性关系约占灌域总面积的 40%,主要集中在南一支、清惠渠、杨家河中段机缘分干渠、东丈支渠、乌兰分干渠、团结分干渠下游段,黄济渠上游段,大发公分干渠下游段,东方红支渠

等,主要作物以葵花、玉米为主。在研究时段内,4 月 26 日,5 月 16 日,6 月 16 日,7 月 1 日,8 月 1 日,9 月 21 日均属灌域的灌溉期,在显著水平区域内有 3 个时相属灌溉期,分别为 4 月 26 日,5 月 16 日,8 月 1 日,其余 7 个时相为非灌溉期,说明灌溉对该区域的影响程度较弱,地下水是影响作物生长的直接因素。

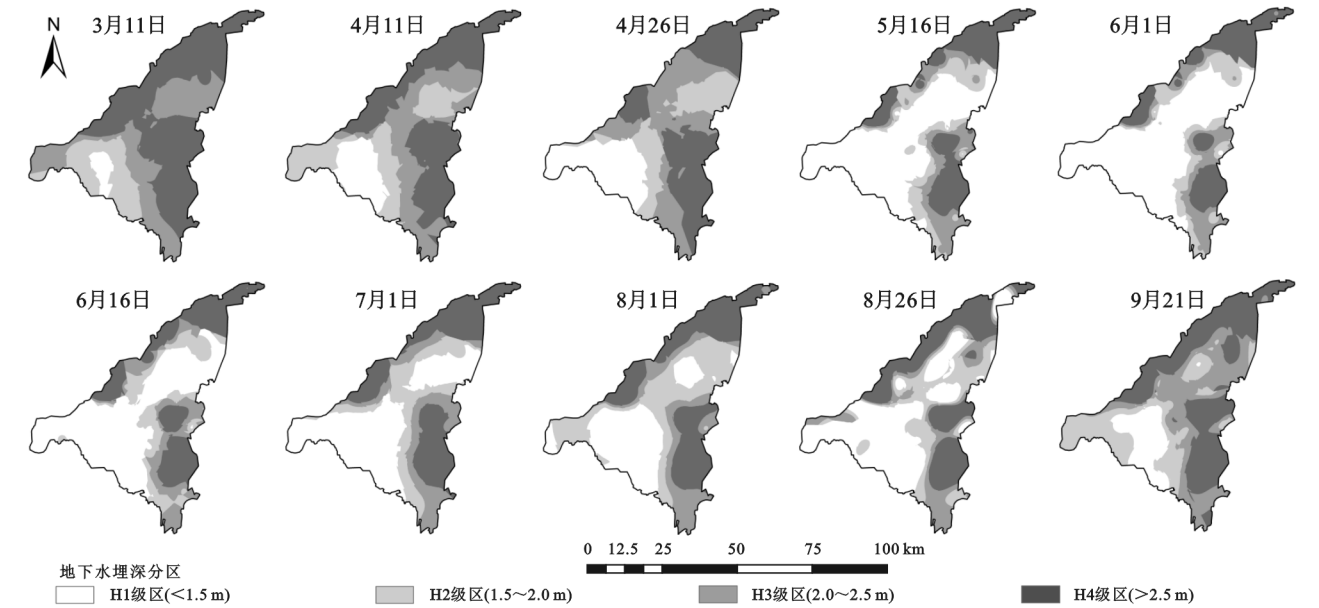


图 3 解放闸灌域 2016 年 3—9 月地下水埋深(H)空间插值结果

表 2 不同时期的地下水埋深(H)分区变化结果

地下水埋深分区	初始期 (3 月 11 日)	冻土消融 水补给期 (4 月 11 日)	灌溉 期始 (4 月 26 日)	灌溉 中期 (5 月 16 日)	灌溉 中期 (6 月 1 日)	主要作物强 耗水期 (6 月 1 日至 8 月 1 日)	灌溉 后期 (8 月 26 日)	休灌期 (9 月 21 日)
H1 级区	3.3	12.0	19.7	46.3	51.5	27.1	38.6	12.4
H2 级区	15.1	21.5	18.5	15.4	14.5	26.4	18.8	21.5
H3 级区	29.2	26.4	27.4	14.0	12.2	15.5	14.0	26.8
H4 级区	52.4	40.1	34.4	24.3	21.8	31.0	28.7	39.2

注:表中数据为不同时期地下水埋深分区面积变化,其中面积以占灌域总面积的百分比(%)表示。

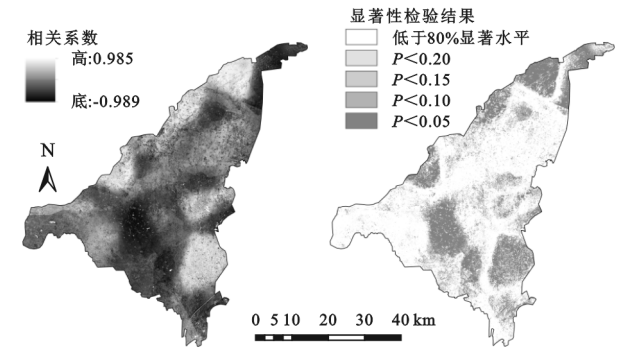


图 4 解放闸灌域 NDVI 与地下水埋深(H)相关系数及显著性检验

随后根据贾俊平^[25]对于相关关系密切程度的判定,可将相关程度分为:当 $|r| \geq 0.8$ 时,为高度相关;当 $0.5 \leq |r| < 0.8$ 时,为中度相关;当 $0.3 \leq |r| < 0.5$ 时,为低度相关;当 $|r| < 0.3$ 时,说明 2 个变量之间的相关程度极弱,可视为非线性相关。解放闸灌域 3—9 月 NDVI 值与地下水埋深(H)值的密切程度结果见图 5。由图 5 可知,

NDVI 与地下水埋深(H)的密切程度集中在中度和高度相关区域,负相关区域集中在灌域的西南部与东端的地下水浅埋区,正相关区域集中在灌域的东南部与北部的地下水深埋区。

2.2 不同埋深分区的 NDVI 变化规律

为了进一步讨论 NDVI 与地下水埋深(H)的关系,通过对灌域不同埋深条件下 NDVI 均值提取计算,得出 H1 级区、H2 级区、H3 级区、H4 级区 NDVI 均值变化曲线(图 6)。由图 6 可知,NDVI 均值随埋深分区的不同而不同,NDVI 均值随埋深分区变化规律为 H1 级区 NDVI 均值>H4 级区 NDVI 均值>H2 级区 NDVI 均值>H3 级区 NDVI 均值,结合前文 NDVI 与 H 的时空相关性分析结果,分析可知,当 $H \leq 2.5$ m 时,不同的埋深分区对灌域的 NDVI 均值的影响为埋深(H)越小,NDVI 均值越大,呈负相关关系变化;当 $H > 2.5$ m 时,NDVI 均值较大,考虑此

时的地下水不再对作物生长进行水分补给,作物长势受其他因子影响更大,因此,此时 NDVI 均值的增大与埋深(H)分区的变化无关。

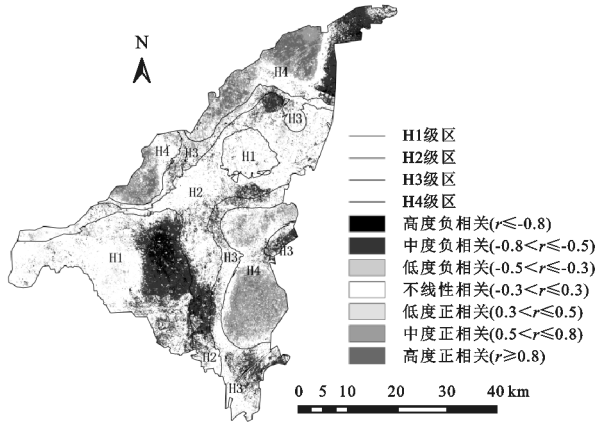


图 5 解放闸灌域 NDVI 与地下水埋深(H) 相关关系的密切程度

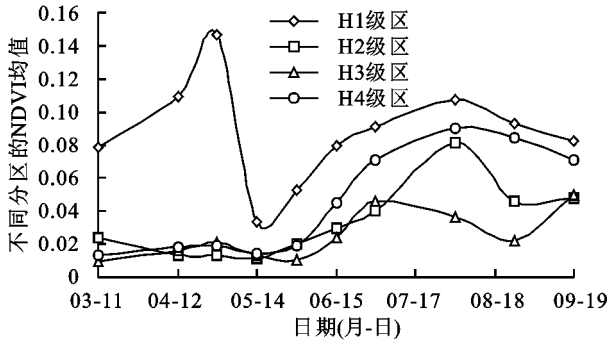


图 6 研究时段地下水埋深分区 NDVI 均值变化曲线

3 讨论

对于地下水埋深较浅的地区,地下水埋深(H)对作物长势 NDVI 的影响不可忽视。本文中 NDVI 与 H 的定量研究结果表明,当地下水埋深处在浅埋区(<2.5 m),对于河套灌区这样的特大型灌区,在作物需水高峰期由于灌溉不适时,地下水补给成为灌溉间歇期内作物耗水的主要来源。同杜军等^[3]在河套灌区研究结论浅水埋深对春小麦影响显著:浅水埋深每增大 1 个水平时,小麦产量就会显著减小相一致,所以 H 与 NDVI 具有明显的线性关系,为提高产量、节约用水、土壤盐渍化防治措施的落实提供可靠性依据。本文以 NDVI 与地下水埋深(H)的地统计分析入手,进而从空间上进行 NDVI 与地下水埋深(H)的点对点的相关性分析,增强了空间上二者相关性的可视性,更能够明确 NDVI 与 H 的定量关系。同时,前人对 NDVI 与地下水埋深(H)的定量关系的研究大多数集中在绿洲、盆地、平原等地区的草甸类植被类型。并且在空间上表现 NDVI 与 H 的显著相关性的可视性较少。因此,本文以河套灌区解放闸灌域为研究区,开展 NDVI 与地下水埋深(H)的定量关系研究具有鲜明特征。能够精准地获取灌域 NDVI 与

地下水埋深(H)相关性的空间布局。此外,土壤盐渍化是灌区的一大特点,土壤盐分对作物生长的影响也不可忽视,本文在分析 NDVI 与地下水埋深(H)定量关系时没有考虑土壤水分、盐分对 NDVI 的影响(限于篇幅,将另文讨论)。

4 结论

(1)NDVI 与地下水埋深(H)存在显著线性关系,二者的密切程度主要以中度和高度相关为主,具有统计学意义的线性关系约占灌域总面积的 40%。

(2)不同分区的埋深(H)与不同时间段的 NDVI 关系表现为当 $H \leq 2.5$ m 时,不同的埋深分区对灌域的 NDVI 均值的影响为埋深(H)越小,NDVI 均值越大,呈负相关关系变化;当 $H > 2.5$ m 时,NDVI 均值较大,埋深对 NDVI 影响不大。

参考文献:

[1] 刘战东,刘祖贵,俞建河,等.地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J].排灌机械,2014,32(7):617-624.

[2] Johansen O M, Andersen D K, Ejrnæs R, et al. Relations between vegetation and water level in groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs) [J].Limnologia,2018,68:130-141.

[3] 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.

[4] Richard Y, Poccard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa [J]. International Journal of Remote Sensing,1998,19(15):2907-2920.

[5] Piao S, Mohammad A, Fang J, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J].Global Environmental Change,2006,16(4):340-348.

[6] Nicholson S E, Farrar T J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall [J].Remote Sensing of Environment,1994,50(2):107-120.

[7] 陈晓宁,蒋好忱.25 年来秦岭 NDVI 指数的气候响应[J].测绘通报,2019(3):103-107.

[8] 尤南山,蒙古军,孙慕天.2000—2015 年黑河流域中上游 NDVI 时空变化及其与气候的关系[J].北京大学学报(自然科学版),2019,55(1):171-181.

[9] 王晓利,侯西勇.1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J].地理研究,2019,38(4):807-821.

[10] 曲学斌,张煦明,孙卓.大兴安岭植被 NDVI 变化及其对气候的响应[J].气象与环境学报,2019,35(2):77-83.

coastal reclaimed tidal land soil by gypsum and rice straw [J].Archives of Agronomy & Soil Science,2016, 63(6):761-77.

[4] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum [J].Resources, Conservation and Recycling,2017,121:82-92.

[5] 马晨,马履一,刘太祥,等.盐碱地改良利用技术研究进展[J].世界林业研究,2010,23(2):28-32.

[6] 邓绍云,邱清华.中国盐碱土壤修复研究综述[J].北方园艺,2011(22):171-174.

[7] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.

[8] 崔媛,张强,王斌,等.脱硫石膏对重度苏打盐化土中主要离子淋洗的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):310-314.

[9] 周亚军,靳红玉,朱春玲,等.富含高分子有机酸的盐碱清除剂对降低土壤含盐量及对棉花出苗率和产量结果的影响[J].陕西农业科学,2008,54(6):27-28.

[10] 陈绪兰,刘萍,张娇阁.棉田播前膜下滴施土壤盐碱改良剂“禾康”的应用效果[J].中国棉花,2016,43(6):34-35,40.

[11] 王新平,赵春艳,加孜拉,等.不同土壤改良剂对新疆盐碱土壤的改良效果研究[J].灌溉排水学报,2010,29(4):133-135.

[12] 王贵连,苗党生.浅谈土壤容重的测定[J].北京农业,2012(3):86.

[13] 朱瑜,张卓栋,刘畅,等.激光粒度仪与吸管法测定土壤机械组成的比较研究:以不同退化程度栗钙土为例[J].水土保持研究,2018,25(3):62-67,204.

[14] 张晓光,曾路生,张志辉,等.不同土壤电导率测量方法对土壤盐渍化表征的影响[J].青岛农业大学学报 2019,36(1):56-60.

[15] 王水献,董新光,吴彬,等.干旱盐渍土区土壤水盐运动数值模拟及调控模式[J].农业工程学报,2012,28(13):142-148.

[16] 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,1988:121-13.

[17] 王全九,邵明安,郑纪勇.土壤水分运动与溶质迁移[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[18] 王文焰,汪志荣,王全九,等.黄土中 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J].水利学报,2003(5):30-34.

[19] 范严伟,赵文举,王昱,等.夹砂层土壤 Green-Ampt 入渗模型的改进与验证[J].农业工程学报,2015,31(5):93-99.

[20] 张建丰,王文焰,汪志荣,等.具有砂质夹层的土壤入渗计算[J].农业工程学报,2004,20(2):27-30.

[21] 徐仁扣,肖双成,李九玉.低分子量有机酸对两种可变电荷土壤吸附铜的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(2):304-307.

[22] 栗杰,张大庚,刘慧,等.低分子量有机酸对褐土盐基离子淋失的影响[J].土壤通报,2017,48(6):1354-1359.

[23] 周蓓蓓,侯亚玲,王全九.枯草芽孢杆菌改良盐碱土过程中水盐运移特征[J].农业工程学报,2018,34(6):104-110.

(上接第 306 页)

[11] 桂娟,王旭峰,李宗省,等.典型冰冻圈地区植被变化对人类活动的响应研究:以祁连山为例[J].冰川冻土,2019,41(5):1235-1243.

[12] 林玉英,胡喜生,邱荣祖,等.基于 Landsat 影像的 NDVI 对植被与影响因子交互耦合的响应[J].农业机械学报,2018,49(10):212-219.

[13] 熊亚兰,张科利,刘佳凤,等.岷江上游小流域多尺度 NDVI 与地形的关系研究[J].地球与环境,2019,47(4):412-418.

[14] Quarmby N, Milnes M, Hindle T , et al. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction [J].International Journal of Remote Sensing, 1993,14(2):199-210.

[15] Mariano F L, Carlos M D B, Américo J D. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires province, Argentina [J].Information Processing in Agriculture,2015,2(2):73-84.

[16] 王利民,刘佳,姚保民,等.基于 GF-1 影像 NDVI 年度间相关分析的冬小麦面积变化监测[J].农业工程学报,2018,34(8):184-191

[17] Yousef Y A. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia [J].Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2011,39(2):171-180.

[18] Wang X W, Xie H J, Guan H D, et al. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions [J].Journal of Hydrology,2007,340(1/2):12-24.

[19] 金晓媚,胡光成,史晓杰.银川平原土壤盐渍化与植被发育和地下水埋深关系[J].现代地质,2009,23(1):23-27.

[20] 段浩,赵红莉,蒋云钟,等.基于 GF-1 的酒泉盆地植被与地下水埋深关系研究[J].科技通报,2018,34(11):216-220.

[21] 马玉蕾,王德,刘俊民,等.黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J].生态学杂志,2013,24(9):2423-2430.

[22] 汤国安,杨昕.地理信息系统空间分析实验教程[M].2 版.北京:科学出版社,2012:292-437.

[23] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M].北京:地资出版社,1988:8-80.

[24] 孔繁瑞,屈忠义,刘雅君,等.不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2009(5):44-48.

[25] 贾俊平.统计学[M].北京:清华大学出版社,2004:323-332.