

# 基于多源遥感数据的河套灌区玉米植株 氮素浓度诊断及污染风险评估

林人财<sup>1</sup>, 陈鹤<sup>1\*</sup>, 张宝忠<sup>1</sup>, 魏征<sup>1</sup>, 李益农<sup>1</sup>, 桑红辉<sup>2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2.南昌工程学院, 南昌 330029)

**摘要:** 【目的】利用多源遥感数据对河套灌区玉米生育期氮素浓度进行诊断并进行氮素污染风险评估, 为施肥决策及农业面源污染溯源提供参考。【方法】基于无人机多光谱遥感数据和实测玉米植株氮素浓度数据, 利用多种植被指数量化玉米植株氮素浓度, 建立玉米生育期氮素浓度诊断模型。对玉米不同生育阶段的植被指数诊断模型进行评价, 得到临界氮素浓度, 并对玉米各生育阶段的氮素污染风险进行评估。【结果】2020年河套灌区玉米种植面积最大, 为27.5万hm<sup>2</sup>, 在玉米各生育阶段中, 拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期和花粒期分别以GBNDVI、RVI、NRI、NDVI建立的氮素浓度诊断模型为最优模型; 基于氮素浓度诊断模型的遥感监测发现, 小喇叭口期、花粒期植株氮素浓度较低, 拔节期、大喇叭口期植株氮素浓度较高; 玉米氮素污染风险主要发生在拔节期、大喇叭口期, 小喇叭口期存在少量的IV级污染风险, 花粒期不存在氮素污染风险。【结论】根据玉米植株氮素浓度诊断模型得到的氮素浓度值, 获得以灌溉单元为基础的氮素污染风险等级分布, 可为施肥决策和农业面源污染溯源提供合理参考。

**关键词:** 氮素浓度; 玉米; 遥感; 污染风险; 河套灌区

中图分类号: S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022349

OSID:



林人财, 陈鹤, 张宝忠, 等. 基于多源遥感数据的河套灌区玉米植株氮素浓度诊断及污染风险评估[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 66-72.

LIN Rencai, CHEN He, ZHANG Baozhong, et al. Diagnosing Nitrogen Content in Maize Canopy in Hetao Irrigation District Using Multi-source Remote Sensing Data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 66-72.

## 0 引言

【研究意义】氮素是构成作物最基本的化学元素之一, 在作物生长过程中具有重要作用<sup>[1]</sup>。氮素的合理施用可及时为作物光合作用提供营养成分, 达到增产提质的效果; 而不科学的氮素施用, 不仅会造成资源浪费, 还会加剧农业面源污染<sup>[2]</sup>。因此, 精准定量施用氮肥有利于提升农业经济效益和生态效益。区域作物氮素浓度快速诊断是精准定量施肥的前提。在此基础上, 对氮素进行污染风险评估, 可为施肥决策及农业面源污染溯源提供依据。

【研究进展】传统的作物氮素浓度诊断方法主要是通过人工识别方法对作物表型和叶片颜色进行综合判断, 或采集植株样本进行化学分析, 如硝酸盐快速诊断法<sup>[3]</sup>。人工识别方法因受主观因素干扰

较大, 且需消耗大量人力、物力和财力, 存在效率及准确度低等问题。虽然化学分析法可获得较为准确的单点氮素浓度, 但难以实现区域尺度氮素浓度的监测。随着遥感技术的发展, 区域氮素浓度监测逐渐普及。目前, 遥感方法已逐步发展为区域尺度氮素浓度监测必不可少的手段之一。Hansen等<sup>[4]</sup>利用高光谱遥感技术, 构建归一化差异植被指数, 并将最佳窄波段指数与偏最小二乘回归结果进行对比, 得出高光谱遥感技术在模拟区域氮素方面的拟合效果较好。Li等<sup>[5]</sup>以冬小麦为研究对象, 定量研究不同生育阶段及不同种植密度下的冬小麦叶片氮素浓度与地面高光谱反射率之间的关系, 并证明了角度不敏感植被指数(AIVI)与冬小麦叶片氮素浓度之间具有较强的相关性。高开秀等<sup>[6]</sup>基于无人机多光谱数据, 利用宽波段植被指数和氮营养指标的相关性, 并通过敏感性分析, 最终确定最佳植被指数可作为有效的氮素营养评价指标。高金龙等<sup>[7]</sup>基于HJ-1A遥感数据和野外观测数据, 建立了高寒草地氮素估测模型, 模型精度高达81.6%。【切入点】以往关于氮素浓度监测的研究大多集中于利用地面光谱仪或无

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409203); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SKL2022TS13); 中国水科院基本科研业务费专项项目(ID0145B022021, ID0145B052021)

作者简介: 林人财(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事农业遥感研究。  
E-mail: rencaih@iwhr.com

通信作者: 陈鹤(1986-), 女, 高级工程师, 主要从事农业遥感研究。  
E-mail: chenhe@iwhr.com

人机进行田块尺度作物氮素浓度的监测。利用机载或星载数据监测区域尺度作物氮素浓度，且在作物不同生育阶段建立不同最优模型的研究较少。河套灌区是我国 3 个特大型灌区之一，是我国粮食生产的“主阵地”。玉米是河套灌区主要种植作物之一，及时、准确地对玉米各生育阶段氮素浓度进行诊断并对氮素污染风险进行评估，可为当地施肥决策和农业面源污染溯源提供合理参考。【拟解决的关键问题】本研究基于 Sentinel-2 遥感数据和去云算法，获取 2020 年河套灌区玉米不同生育阶段的不同光谱特征数据，并得到各生育阶段最优氮素浓度诊断模型。在此基础上，对玉米各生育阶段进行氮素污染风险评估，以期对施肥决策和农业面源污染溯源提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部，北抵阴山山脉的狼山及乌拉山，南邻黄河，东与包头市接壤，西与乌兰布和沙漠相邻，横跨巴彦淖尔市的乌拉特前旗、五原县、临河市、杭锦后旗、磴口县，东西长 250 km，南北宽 50 km。灌区由乌兰布和、解放闸、永济、义长、乌拉特灌域 5 个灌域组成（图 1）。灌区属中温带大陆性季风气候区，降水量少、蒸发量大。年平均降水量为 130~250 mm，年最大降水量为 432.6 mm；年平均蒸发量为 2 000~2 400 mm。

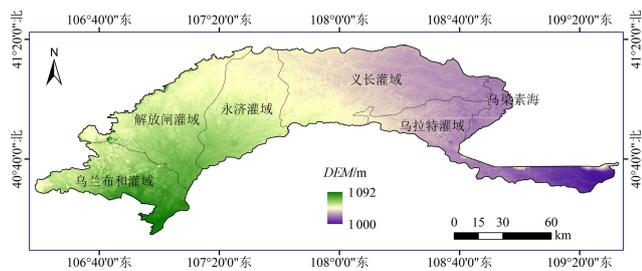


图 1 河套灌区地理位置

Fig.1 The geographical location of the Hetao Irrigation District

### 1.2 试验及数据来源

#### 1.2.1 玉米植株氮素浓度

于 2019 年在内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗联增村核心区科技试验田内进行玉米植株氮素浓度测定，氮素浓度的实测数据主要用于氮素浓度诊断模型的构建与验证。在玉米播种 30 d 后，每 10 天开展 1 次氮素浓度监测，直至玉米生育期结束。玉米生育期共划分为 4 个生育阶段，分别为：拔节期（7 月 1—20 日）、小喇叭口期（7 月 21—28 日）、大喇叭口期（7 月 29 日—8 月 6 日）和花粒期（8 月 7 日—9 月 31 日）。于每个小区取 3 株代表性玉米植株，将

植株样本在恒温 105 °C 条件下杀青 1 h，置于恒温 75 °C 环境下烘干至恒质量，测量干物质质量。将烘干后的干物质粉碎过筛，称取 1 g 样本粉末装入消化管，加入 2 片催化剂，然后加入浓硫酸 12 mL，置于 420 °C 消化池内进行消化，冷却后将消煮液转移至凯氏定氮仪中测定植株氮素浓度。临界氮素浓度计算式为：

$$N_c = aW_{\max}^{-b}, \quad (1)$$

式中： $N_c$  为临界氮素浓度（%）； $a$  为地表植物单位生物量的临界氮素浓度（%）； $b$  为临界氮素浓度的稀释系数； $W_{\max}$  为生物量最大值（ $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）。参数具体计算方法详见 Han 等<sup>[8]</sup>的研究。

#### 1.2.2 施肥设计

施肥分为施底肥（“科霸”复混肥料）和追肥（尿素）。试验设置 5 个施氮处理，N3 为当地标准施氮量，在 N3 的基础上分别设置增加 50% 和减少 25%、50% 的施氮量处理。5 个施氮处理分别为 N0（不施氮）、N1（施氮 225  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）、N2（施氮 337.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）、N3（施氮 450  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ）和 N4（施氮 675  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ），每个处理设置 3 个重复。

#### 1.2.3 冠层多光谱数据

无人机试验借助的平台是开源飞控 Pixhawk 控制的经纬 M600 型六旋翼无人机系统，搭载的遥感传感器为 RedEdge。相机焦距为 5.5 mm，相机设有 5 个光谱通道，中心波长分别为 475 nm（蓝）、560 nm（绿）、668 nm（红）、840 nm（近红外）和 717 nm（红边），相机同时配备 1 块 30 cm×30 cm 的灰板和光强传感器。光强传感器可校正拍摄过程中外界光线的影像，灰板具有固定的反射率，无人机测量前后均进行灰板校正。

无人机影像于 2019 年 7—9 月获取，与地面数据采集时间同步，共采集 7 次。每次拍摄时间为 10:00—12:00，飞行高度为 60 m，飞行时固定航线，航向和旁向重叠度为 80%，地面分辨率为 4.09 cm，飞行速度为 3 m/s，将飞行后采集的 335 景影像导入 Pix4Dmapper 软件进行拼接，经过灰板反射率校正后获取研究区的反射率影像和正射影像。

#### 1.2.4 Sentinel-2 影像

Sentinel-2 是欧洲航天局倡议的全球环境与安全监测系统（GMES）的重要组成部分。Sentinel-2 数据中的多光谱包含 13 个波段，不同波段的分辨率不同（表 1）。为定量表征灌区玉米植株氮素浓度，选取玉米生育期内云量小于 10% 且质量较好的影像用于后续研究。所有数据均为几何校正处理后的 L1C 大气顶层反射率数据。因此，只需利用 SNAP

软件进行大气校正, 得到地表反射率。同时, 使用最邻近插值法, 将处理后的波段重采样为 10 m 精度, 通过波段运算工具计算得到植被指数, 用于量化玉米植株氮素浓度。

表 1 Sentinel-2 卫星参数信息

Table 1 Parameter information of Sentinel-2 satellite

波段	中心波长/nm	波段宽度/nm	空间分辨率/m
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1 375	30	60
11	1 610	90	20
12	2 190	180	20

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 植被指数

植被指数可用于定量表征植株氮素浓度。由于植株在不同生育阶段的生长状况不同, 各波段对植株生长敏感性亦不相同。灌区玉米各生育阶段氮素浓度诊断模型采用植被指数有归一化植被指数 (NDVI)<sup>[9]</sup>、蓝边归一化植被指数 (BNDVI)<sup>[10]</sup>、绿蓝边归一化植被指数 (GBNDVI)<sup>[10]</sup>、绿红边归一化植被指数 (GRNDVI)<sup>[10]</sup>、标准叶绿素指数 (NPCI)<sup>[11]</sup>、比植被指数 (RVI)<sup>[12]</sup>、作物氮反应指数 (NRI)<sup>[13]</sup>和差值植被指数 (DVI)<sup>[14]</sup>, 计算式分别为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R), \quad (2)$$

$$BNDVI = (\rho_{NIR} - \rho_B) / (\rho_{NIR} + \rho_B), \quad (3)$$

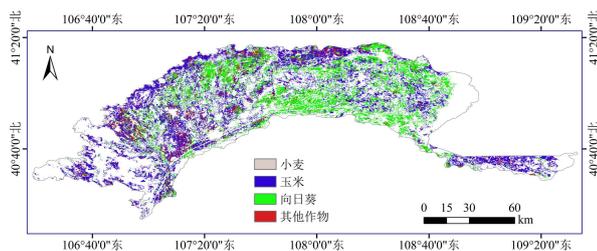
$$GBNDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G - \rho_B) / (\rho_{NIR} + \rho_G + \rho_B), \quad (4)$$

$$GRNDVI = (\rho_{NIR} - \rho_G - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_G + \rho_R), \quad (5)$$

$$NPCI = (\rho_R - \rho_B) / (\rho_R + \rho_B), \quad (6)$$

$$RVI = \rho_{NIR} / \rho_R, \quad (7)$$

$$NRI = \rho_R / (\rho_R + \rho_G + \rho_B), \quad (8)$$



(a) 不同作物空间分布

$$DVI = \rho_R - \rho_B, \quad (9)$$

式中:  $\rho_{NIR}$  为近红外波段反射率;  $\rho_R$  为红波段反射率;  $\rho_B$  为蓝波段反射率;  $\rho_G$  为绿波段反射率。

#### 1.3.2 氮素污染风险评估

氮素污染风险等级划分的依据是低于临界氮素浓度的区域为无污染风险区, 在污染风险图中以无颜色表示, 若部分超过临界氮素浓度时, 氮素浓度每上升 0.5%, 划分一个污染风险等级, 等级越高, 风险越大, 共分为 4 个风险等级, 超出临界氮素浓度 2% 的部分全部划分到 IV 级污染风险区; 若氮素浓度均大于临界氮素浓度, 则平均划分为 4 个污染风险等级。

#### 1.3.3 评价指标

为优选各生育阶段的氮素诊断模型, 选择决定系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 ( $RMSE$ ) 对模型进行评价。 $R^2$  表示模型的拟合程度,  $R^2$  越大则模型拟合效果越好;  $RMSE$  表示模型的预测精度,  $RMSE$  越小则模型的预测精度越高。计算式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{S})^2}, \quad (10)$$

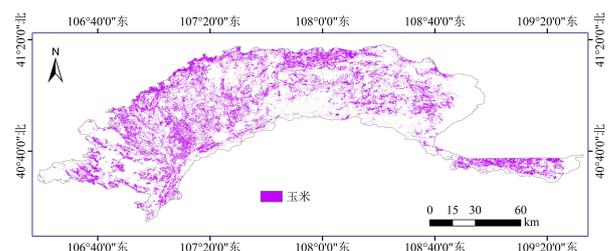
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}, \quad (11)$$

式中:  $n$  为验证样本数;  $M_i$  和  $S_i$  分别为实测值和估测值;  $\bar{S}$  为平均估算值。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌区作物空间分布

2020 年, 河套灌区内种植的主要作物有玉米、向日葵、小麦。通过遥感方法<sup>[15]</sup>对作物进行识别, 得到 2020 年河套灌区作物空间分布状况 (图 2)。玉米、向日葵、小麦及其他作物的种植面积分别为 27.5 万、21.1 万、1.7 万、7.4 万  $\text{hm}^2$ , 其种植面积占作物总种植面积的比例分别为 47.64%、36.58%、2.98%、12.80%。相较于灌区内向日葵、小麦和其他作物, 玉米的种植面积最大, 种植密度相对均匀, 且基本覆盖全灌区。因此, 重点选取玉米为研究对象, 在玉米各生育阶段建立氮素浓度诊断模型, 并进行氮素污染风险评估。



(b) 玉米空间分布

图 2 2020 年河套灌区作物空间分布

Fig.2 Spatial distribution of crops in the Hetao Irrigation District in 2020

## 2.2 灌区玉米生育阶段氮素浓度诊断模型优选

玉米各生育阶段氮素浓度诊断模型以植被指数为自变量 ( $x$ )，植株氮素浓度为因变量 ( $y$ )，采用线性及非线性回归相结合的方法，分析各生育期植被指数与植株氮素浓度之间的关系，并得到模型评价结果 (表 2)。在拔节期，*BNDVI*、*GBNDVI*、*NDVI* 对应的氮素诊断模型  $R^2$  分别为 0.79、0.83、0.84，*RMSE* 分别为 0.28%、0.26%、0.31%，综合考虑模型拟合优度及预测精度，以 *GBNDVI* 建立的模型为最优诊断模型；在小喇叭口期，*NPCI*、*BNDVI*、*RVI* 对应的氮素诊断模型  $R^2$  分别为 0.21、0.27、0.25，*RMSE* 分别为 0.04%、0.06%、0.04%，综合考虑模型拟合优度及预测精度，以 *RVI* 建立的模型为最优诊断模型；在大喇叭口期，*NRI*、*BNDVI*、*DVI* 对应的氮素诊断模型  $R^2$  分别为 0.61、0.14、0.22，*RMSE* 分别为 0.31%、0.48%、0.40%，综合考虑模型拟合优度及预测精度，以 *NRI* 建立的模型为最优诊断模型；在花期期，*NRI*、*NDVI*、*GRNDVI* 对应的氮素诊断模型  $R^2$  分别为 0.33、0.39、0.16，*RMSE* 分别为 0.22%、0.15%、0.68%，综合考虑模型拟合优度及预测精度，以 *NDVI* 建立的模型为最优诊断模型。由模型评价结果及计算得到的玉米各生育阶段植株临界氮素浓度可知，拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、花期期的临界氮素浓度分别为 3.52%、2.69%、2.50%、1.5%。

表 2 玉米植株氮素浓度诊断模型及评价结果

Table 2 Multispectral diagnosis model and evaluation results of nitrogen in maize plants

生育期	光谱指数	模型	$R^2$	<i>RMSE</i> /%
拔节期	<i>BNDVI</i>	$y=-3.68x+6.48$	0.79	0.28
	<i>GBNDVI</i>	$y=-1.17\ln x+2.78$	0.83	0.26
	<i>NDVI</i>	$y=-1.99\ln x+3.10$	0.84	0.31
小喇叭口期	<i>NPCI</i>	$y=1.72x+2.66$	0.21	0.04
	<i>BNDVI</i>	$y=4.86x-1.62$	0.27	0.06
	<i>RVI</i>	$y=2.12e^{0.01x}$	0.25	0.04
大喇叭口期	<i>NRI</i>	$y=-5.83x+4.46$	0.61	0.31
	<i>BNDVI</i>	$y=-1.99\ln x+3.10$	0.14	0.48
	<i>DVI</i>	$y=4.03e^{-1.15x}$	0.22	0.40
花期期	<i>NRI</i>	$y=1.93x+1.09$	0.33	0.22
	<i>NDVI</i>	$y=2.01x^{1.51}$	0.39	0.15
	<i>GRNDVI</i>	$y=2.19x^{0.77}$	0.16	0.68

## 2.3 灌区玉米生育阶段氮素浓度诊断

基于 2.2 节确定的各生育阶段最优植株氮素浓度诊断模型，反演得到玉米各生育阶段植株氮素浓度空间分布 (图 3)。不同生育阶段植株氮素浓度差异较大，玉米拔节期、大喇叭口期植株氮素浓度较高，分别介于 0~24.11%、0~10.25%之间，且全区玉米植株氮素浓度总体呈正态分布，2 个生育阶段氮素浓度主要介于 3.12%~4.53%、2.53%~5.34%之间，标准差分别为 0.56%、0.60%；小喇叭口期、花期期植株氮素浓度相对较低，分别介于 0~3.24%、0~2.00%之间，2 个生育阶段氮素浓度主要介于 0.40%~2.66%和 0.09%~1.73%之间，标准差分别为 0.51%和 0.46%。

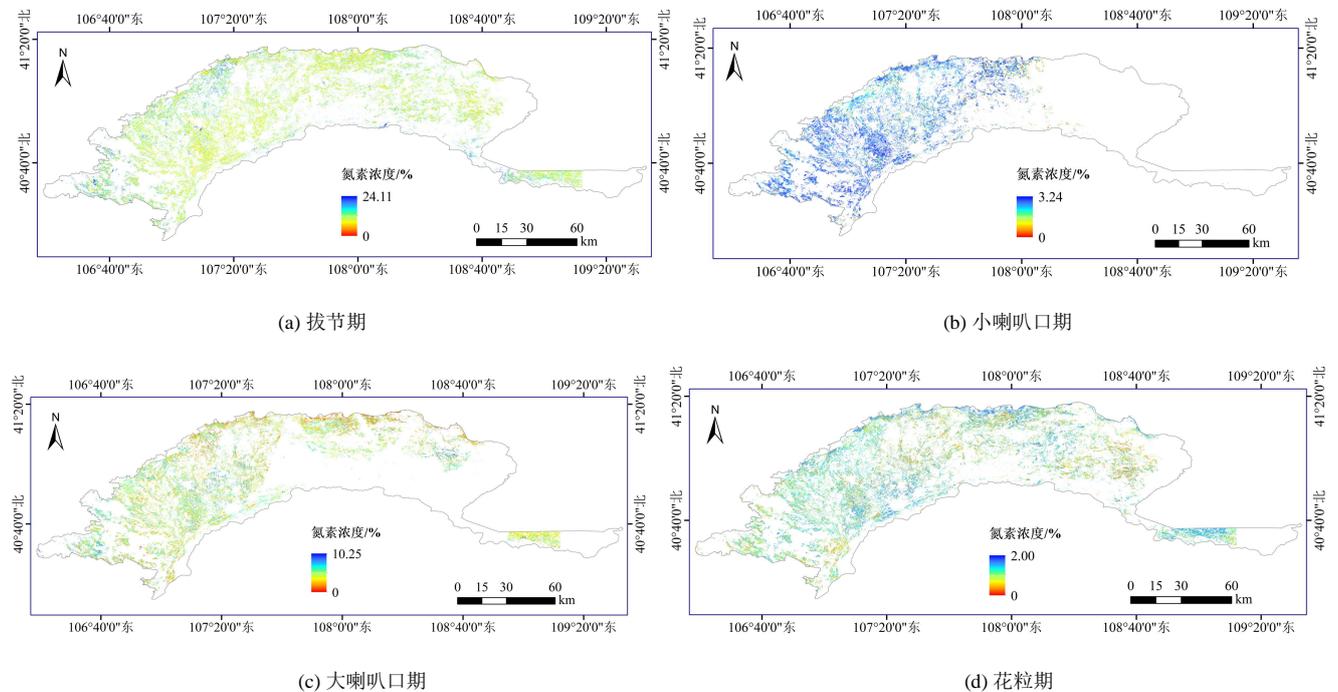


图 3 各生育阶段玉米植株氮素浓度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of nitrogen concentration in maize plants in different growth stages

## 2.4 灌区玉米生育期内氮素污染风险评估

根据河套灌区主要灌溉渠道及排水沟道的分布

现状，将灌区划分为 62 个灌溉单元，分别对玉米 4 个生育阶段各灌溉单元内的植株氮素浓度进行统计

分析, 得到 62 个灌溉单元玉米植株氮素浓度平均值, 进而得到各生育阶段氮素污染风险等级分布 (图 4)。由玉米植株氮素浓度诊断模型及评价结果可知, 拔节期临界氮素浓度为 3.52%, 各灌溉单元玉米植株氮素浓度均大于临界氮素浓度, 氮素浓度平均值为 3.64%, 由氮素污染风险等级划分原则, 将其划分为 4 个氮素污染风险等级, I~IV 级氮素污染风险区的氮素浓度取值范围分别为 3.59%~3.73%、3.73%~3.80%、3.80%~3.88%、3.88%~4.18%, 大多灌溉单元在 I、II 级污染风险区范围内。玉米小喇叭口期临界氮素浓度为 2.69%, 植株氮素浓度平均值为 1.95%, 该生育阶段仅有少量灌溉单元植株氮

素浓度大于 3.69%, 处于 IV 级污染风险区, 大部分灌溉单元无氮素污染风险。玉米大喇叭口期临界氮素浓度为 2.5%, 植株氮素浓度均值为 3.77%, 位于灌区东南部的少量区域无氮素污染风险, 其他区域处于 II~IV 级污染风险区, 氮素浓度取值范围分别为 3%~3.5%、3.5%~4%、4%~4.2%, 大部分灌溉单元处于 IV 级污染风险区。玉米花粒期灌溉单元氮素浓度介于 0.73%~1.29% 之间。由玉米植株氮素浓度诊断模型及评价结果, 玉米花粒期临界氮素浓度为 1.5%, 花粒期各灌溉单元植株氮素浓度均低于临界氮素浓度, 氮素浓度平均值为 1.09%, 故花粒期不存在氮素污染风险。

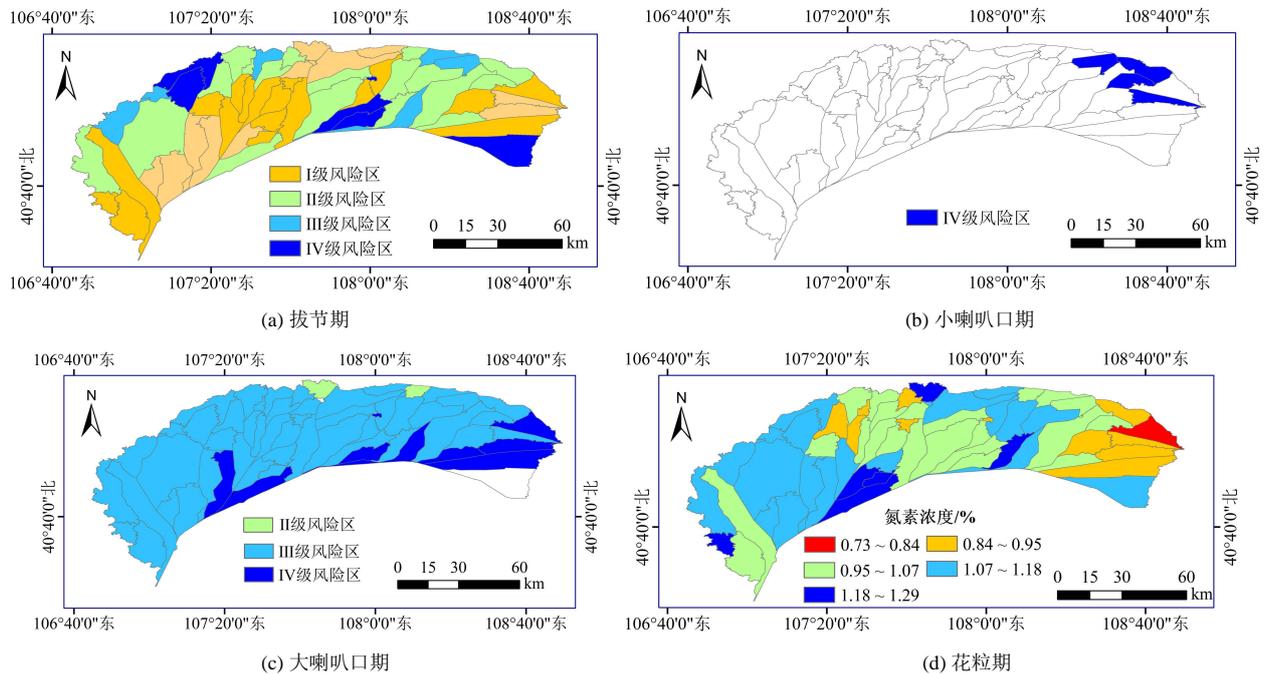


图 4 玉米各生育阶段植株氮素浓度与污染风险等级分布

Fig.4 Nitrogen concentration or risk map of maize plants at different growth stages

### 3 讨论

相比灌区内向日葵、小麦和其他作物, 玉米种植面积最大, 种植密度相对均匀, 基本覆盖全灌区, 故本研究选取玉米为研究对象。然而, 高永道等<sup>[16]</sup>基于 MODIS 数据分析 2000—2018 年河套灌区主要农作物种植结构变化, 发现不同年份灌区作物种植面积变化较大, 2000 年小麦种植面积约占灌区总种植面积的 50%。因此, 下一步可针对其他主要作物 (小麦、向日葵) 或综合考虑所有作物开展氮素浓度诊断研究。

河套灌区玉米拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、花粒期分别以 *GBNDVI*、*RVI*、*NRI*、*NDVI* 建立的氮素浓度诊断模型为最优模型。可见, 不同生育阶段表征植株氮素浓度的最优植被指数不同, 这主要是由于作物在不同生育阶段长势变化明显, 光谱

波段在不同生育阶段对作物生长的敏感性不同造成的<sup>[17]</sup>。本研究使用 8 种植被指数进行玉米生育阶段氮素浓度诊断模型建立。目前, 高达 30 种以上植被指数用于植被氮素浓度估测, 如叶绿素吸收率指数 (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index, *MCARI*)<sup>[18]</sup>、冠层叶绿素浓度指数 (Canopy Chlorophyll Concentration Index, *CCCI*)<sup>[19]</sup>、改进的转换型叶绿素吸收率指数 (Modified Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index, *MTCARI*)<sup>[20]</sup>、归一化红边指数 (Normalized Difference Red Edge Index, *NDRE*)<sup>[21]</sup>等。不同植被指数可能会因区域、气候不同而导致氮素浓度估测的有效性或精度存在差异。在不同区域或气候区, 太阳辐射存在差异, 各气象因子间的相互影响机制亦不一致, 而气象因子会影响可见光的反射与吸收<sup>[22]</sup>。

2020 年灌区玉米植株氮素浓度诊断结果显示,

小喇叭口期、花粒期氮素浓度较低, 拔节期、大喇叭口期氮素浓度较高, 这可能与 2 个方面原因有关: 一是施肥管理凭借主观经验, 容易对植株氮素浓度产生影响; 二是玉米自身生长特性对氮素浓度产生影响, 不同生育阶段植株体内的生物、化学作用不同, 所需的营养物质亦不同<sup>[23]</sup>。此外, 目前关于氮素污染风险等级划分的研究鲜见报道, 基于统计学方法和大量的样本(像元)值, 本研究提出了污染风险等级划分方法, 以期为区域尺度氮素污染风险等级划分提供科学依据。研究发现, 2020 年河套灌区玉米氮素污染风险主要发生在拔节期、大喇叭口期, 小喇叭口期存在少量 IV 级污染风险区, 表明在拔节期、大喇叭口期氮肥施用不科学, 造成资源浪费和农业面源污染。未来将开展河套灌区面源污染分布式模拟评估, 综合考虑植物生长、地表径流、溶质运移、蒸散发等因素, 重点分析施肥方式对作物产量及农业面源污染的影响, 为灌区合理施肥提供科学参考。

#### 4 结论

1) 河套灌区玉米拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、花粒期分别以 *GBNDVI*、*RVI*、*NRI*、*NDVI* 建立的氮素诊断模型为最优模型,  $R^2$  介于 0.25~0.83 之间, *RMSE* 介于 0.04%~0.31% 之间。

2) 河套灌区玉米拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、花粒期最优氮素诊断模型能较好地反演玉米植株氮素浓度, 并获得空间分布信息, 不同生育阶段玉米植株氮素浓度差异较大。

3) 由最优氮素诊断模型得到的氮素浓度值, 可为施肥决策和农业面源污染溯源研究提供科学参考。

#### 参考文献:

[1] GUO B B, QI S L, HENG Y R, et al. Remotely assessing leaf N uptake in winter wheat based on canopy hyperspectral red-edge absorption[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82: 113-124.

[2] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 等. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J]. *遥感学报*, 2003, 7(1): 73-80.

XUE Lihong, LUO Weihong, CAO Weixing, et al. Research progress on the water and nitrogen detection using spectral reflectance[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(1): 73-80.

[3] 曹洪生, 黄德明, 俞仲林, 等. 小麦追施氮肥的快速营养诊断技术研究[J]. *南京农业大学学报*, 1990, 13(1): 8-13.

CAO Hongsheng, HUANG Deming, YU Zhonglin, et al. Studies on the technics of nutrient diagnosis for nitrogen top dressing in winter wheat[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1990, 13(1): 8-13.

[4] HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 542-553.

[5] LI H, XIAO S, WEI F, et al. Improved remote sensing of leaf nitrogen

concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 122-133.

[6] 高开秀, 高雯晗, 明金, 等. 无人机载多光谱遥感监测冬油菜氮素营养研究[J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(2): 232-242.

GAO Kaixiu, GAO Wenhan, MING Jin, et al. Monitoring of nitrogen nutrition in winter rapeseed using UAV-borne multispectral data[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2019, 41(2): 232-242.

[7] 高金龙, 孟宝平, 杨淑霞, 等. HJ-1A 卫星数据的高寒草地氮素评估: 以青海省贵南县及玛沁县高寒草地为例[J]. *草业学报*, 2016, 25(10): 11-20.

GAO Jinlong, MENG Baoping, YANG Shuxia, et al. Estimation of nitrogen content of alpine grassland in Maqin and Guinan Counties, Qinghai Province, using remote sensing[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(10): 11-20.

[8] HAN N N, ZHANG B Z, LIU Y, et al. Rapid diagnosis of nitrogen nutrition status in summer maize over its life cycle by a Multi-Index synergy model using ground hyperspectral and UAV multispectral sensor data[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(1): 122.

[9] 刘莹, 朱秀芳, 徐昆. 用于灌溉耕地制图的特征变量优选[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(3): 119-127.

LIU Ying, ZHU Xiufang, XU Kun. Optimizing the feature variables for irrigated farmland mapping[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(3): 119-127.

[10] 王福民, 黄敬峰, 唐延林, 等. 新型植被指数及其在水稻叶面积指数估算上的应用[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 159-166.

WANG Fumin, HUANG Jingfeng, TANG Yanlin, et al. New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(2): 159-166.

[11] PEUELAS J, GAMON J A, FREDEEN A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 135-146.

[12] 张悦琦, 李荣平, 穆西晗, 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 Yueqi, LI Rongping, MU Xihan, 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.

[13] KAWASHIMA S, NAKATANI M. An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera[J]. *Annals of Botany*, 1998, 81: 49-54.

[14] 王方永, 王克如, 李少昆, 等. 利用数码相机和成像光谱仪估测棉花叶片叶绿素和氮素含量[J]. *作物学报*, 2010, 36(11): 1 981-1 989.

WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al. Estimation of chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaves using digital camera and imaging spectrometer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1 981-1 989.

[15] 刘昊. 基于 Sentinel-2 影像的河套灌区作物种植结构提取[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 32(2): 88-95.

LIU Hao. Extraction of crop planting structure in Hetao irrigated area based on Sentinel-2[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 32(2): 88-95.

[16] 高永道, 乔荣荣, 季树新, 等. 内蒙古河套灌区作物种植结构变化及其驱动因素[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 110-117.

GAO Yongdao, QIAO Rongrong, JI Shuxin, et al. Changes and driving factors of crops planting structure in Hetao Irrigation Region in Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(3): 110-117.

[17] SUN H R, WANG L, LIN R C, et al. Mapping plastic greenhouses with two-temporal Sentinel-2 images and 1D-CNN deep learning[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2 820.

[18] 努热曼古丽 托乎提, 聂臣巍, 余汛, 等. 基于高光谱指数的叶片尺度叶绿素荧光参数反演[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5): 73-80.

- NUREMANGULI Tuohuti, NIE Chenwei, YU Xun, et al. Retrieval of leaf-scale chlorophyll fluorescence parameters based on hyperspectral index[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(5): 73-80.
- [19] 牛鲁燕, 蒋风伟, 张俊丽, 等. 基于无人机多光谱遥感的小麦长势监测研究[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(3): 139-145.
- NIU Luyan, JIANG Fengwei, ZHANG Junli, et al. Study on wheat growth monitoring based on UAV multi-spectrum[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(3): 139-145.
- [20] 孟庆野, 董恒, 秦其明, 等. 基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(8): 2 218-2 222.
- MENG Qingye, DONG Heng, QIN Qiming, et al. MTCARI: A kind of vegetation index monitoring vegetation leaf chlorophyll content based on hyperspectral remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(8): 2 218-2 222.
- [21] 李鑫格, 项方林, 吴思雨, 等. 基于植被指数时序动态的冬小麦氮素营养诊断方法[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(8): 1-11.
- LI Xin'ge, XIANG Fanglin, WU Siyu, et al. Diagnosis methods for nitrogen status based on the time-series vegetation index in winter wheat online first[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(8): 1-11.
- [22] 陈向红. 地面反射率与若干气象因子关系的初步分析[J]. *成都气象学院学报*, 1999, 14(3): 233-238.
- CHEN Xianghong. Relationship between surface albedo and some meteorological factors[J]. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology*, 1999, 14(3): 233-238.
- [23] 范震, 赵有欣, 陈钰蓉, 等. 不同类型缓/控释氮肥对夏玉米生长及产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(3): 79-83.
- FAN Zhen, ZHAO Youxin, CHEN Yurong, et al. Effects of different types of slow/controlled-release nitrogen fertilizers on growth and yield of summer maize[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(3): 79-83.

## Diagnosing Nitrogen Content in Maize Canopy in Hetao Irrigation District Using Multi-source Remote Sensing Data

LIN Rencai<sup>1</sup>, CHEN He<sup>1\*</sup>, ZHANG Baozhong<sup>1</sup>, WEI Zheng<sup>1</sup>, LI Yinong<sup>1</sup>, SANG Honghui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** 【Objective】 Precision agriculture needs a rapid diagnosis of water and nutrient deficits, which is challenging at large scales in the field. Taking maize as an example, this paper proposes to estimate nitrogen content in maize canopy using remote sensing data. 【Method】 The study was carried out at Hetao Irrigation District using UAV multi-spectral imagery data measured in 2020. A variety of vegetation indices extracted from the imageries were used to calculate nitrogen content in the canopy when the crop grew to different stages. The model was validated against ground-truth data and was then used to evaluate critical nitrogen concentration and potential nitrogen pollution at different growth stages. 【Result】 The planted area of maize in Hetao Irrigated District in 2020 was 275 000 hm<sup>2</sup>. The suitable vegetation indices for calculating canopy nitrogen varied with growing stages; the canopy nitrogen at elongation, early and late tasseling stage and flowering stage was best estimated by *GBNDVI*, *RVI*, *NRI*, and *NDVI*, respectively. It was found that nitrogen concentration in the canopy was low at the flowering stage, and high at the elongation and later tasseling stage, during which nitrogen pollution could occur. Analysis showed that the risk of nitrogen pollution was Grade 4 in early tasseling stage and zero in flowering stage. 【Conclusion】 The UAV multispectral image data can be used to estimate nitrogen content in plant and assess the potential of nitrogen pollution at different growing stages at large scales in the field. It can help improve fertilization and reduce the potential of non-point source pollution.

**Key words:** nitrogen concentration; maize; remote sensing; pollution risk; the Hetao Irrigation District

责任编辑: 韩 洋