

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029

# 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析

白亮亮<sup>1,2</sup> 蔡甲冰<sup>1,2</sup> 刘钰<sup>1,2</sup> 蔡学良<sup>3</sup> 陈鹤<sup>1,2</sup> 张宝忠<sup>1,2</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. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048;

3. 国际水资源管理研究所驻南非办公室, 比勒陀利亚 0184)

**摘要:** 利用数据融合算法(ESTAFM)对 Landsat7 ETM+ 和 MODIS 影像进行融合, 构建了高时空 NDVI 数据集; 结合地面实体作物 NDVI 变化特征和光谱耦合技术(SMT), 提取了解放闸灌域 2000—2015 年间种植结构空间信息; 在此基础上分析了其时空特征变化以及地下水对种植结构调整的制约性。利用 2015 年实地调查数据对遥感监测结果进行评价, 灌区主要作物类型玉米、向日葵、小麦以及套种的纯像元分类精度分别达到了 95%、88%、91% 和 90%, 总体精度达到了 91%; 多年遥感监测结果与历史统计数据相吻合。研究结果表明: 玉米和小麦种植面积不断增加, 玉米种植面积增加尤为明显, 由 2000 年的 0.83 万  $\text{hm}^2$  (占灌溉面积的 5.80%) 增加到 2015 年的 4.02 万  $\text{hm}^2$  (占灌溉面积的 28.31%); 向日葵种植面积由下降变为上升趋势, 其种植规模受市场因素主导; 因土地流转、农村劳动力的外流以及套种种植模式劳动力成本高, 使得农户转向单一作物种植模式, 套种模式种植面积逐年下降, 由 2000 年的 4.30 万  $\text{hm}^2$  (占灌溉面积的 30.32%) 减少到 2015 年的 0.41 万  $\text{hm}^2$  (占灌溉面积的 2.91%)。种植结构空间格局与地下水埋深分布相似, 其空间的相对差异并未随时间发生明显变化。向日葵在地下水埋深较浅、盐碱化偏高的区域分布集中, 玉米、小麦及套种在地下水埋深大、盐碱化偏弱的区域分布集中, 反映出向日葵耐盐性更高, 更能适应盐碱化程度高的土壤; 作物这一空间分布格局不仅受水士环境影响, 而且与作物生理特征密切相关。灌区节水改造以来, 在净引水量减小的情况下, 农田蒸散发量并未减小, 而是表现为稳中有升的趋势, 这与高耗水作物玉米种植面积逐年增加有直接关系; 地下水位整体下降, 由 1.76 m 下降到 2.33 m, 土壤盐碱化得到改善, 表明大型灌区节水续建配套项目实施以来, 节水改造对水循环和水土环境起到了积极的影响。

**关键词:** 种植结构; 时空变化; 地下水; 遥感; 数据融合; 节水改造

**中图分类号:** S127      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0202-10

## Temporal and Spatial Variation of Crop Planting Structure and Its Correlation Analysis with Groundwater in Large Irrigation Area

Bai Liangliang<sup>1,2</sup> Cai Jiabing<sup>1,2</sup> Liu Yu<sup>1,2</sup> Cai Xueliang<sup>3</sup> Chen He<sup>1,2</sup> Zhang Baozhong<sup>1,2</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. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China

3. Southern Africa Office, International Water Management Institute, Pretoria 0184, South Africa)

**Abstract:** Crop planting structure was generally considered to be basic data for assessment of water productivity and agricultural irrigation water management. And the adjustment and spatial distribution of crop planting structure was closely related to the water consumption and the improvement of soil and water environment, especially in large irrigation district of north China. To deal with water resources crisis caused by climate change and intensified human activities in Hetao irrigation district in north China, many water-saving irrigation projects were taken to solve the problems since 1999. In recent years, net

收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01、2012BAD08B04)和国家自然科学基金项目(51379217)

作者简介: 白亮亮(1986—), 男, 博士生, 主要从事农业遥感及节水灌溉理论与技术研究, E-mail: bl306@126.com

通信作者: 刘钰(1955—), 女, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: liuyu@iwhr.com

water diversion and ground water depth tended to decrease obviously, and the irrigation efficiency of irrigation districts tended to increase which showed good result of water conservation projects. The purpose of this study was to discover the changes of planting structure adjustment, the characteristics of spatial distribution, the effect on agricultural water consumption changes and the response to the distribution of groundwater. A data fusion approach (Enhance spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, ESTAFM) was applied to generate synthetic Landsat7 ETM+ data with MODIS and construct the high spatial and temporal NDVI data sets. And major crop types were extracted successfully by spectral matching technique (SMT) in 2015. The positional accuracy of maize, sunflower, wheat and interplanting were 95%, 88%, 91% and 90% respectively and the historical change of total area of different crops was consistent with the statistics data. Using this method, the planting structure of Jiefangzha irrigation area, the second largest irrigation field in Hetao irrigation district, was effectively extracted over the years and its temporal and spatial variation and correlation with the distribution of groundwater depth were acquired. The result showed that the area of maize and wheat was increasing, the sunflower was decreasing firstly and later converted into an upward trend, and the interplanting area was declining year by year. The factor for the changes of crop planting structure mainly attributed to the market demand and national policies. For spatial distribution, sunflower concentrated in the region with severe salinization in shallow groundwater level, on the contrary, the maize, wheat and intercropping concentrated in the region with slight salinization in deeper groundwater level. The spatial distribution of crop planting was not only closely related to water and soil environment but also physiological characteristics of crops. Although net water diverted from Yellow River decreased year by year, the agricultural evapotranspiration showed an upward trend which caused by planting structure, especially the variation of maize. The groundwater depth declined from 1.76 m to 2.33 m and the water and soil environment was improved which was contributed to the good performance of water-saving projection.

**Key words:** planting structure; temporal and spatial variation; ground water; remote sensing; data fusion; water-saving reconstruction

## 引言

从20世纪90年代开始,为应对黄河水资源日益紧缺和供需矛盾的现状,黄河水利委员会对黄河水量实行统一调度,将河套灌区年引黄水量由52亿 $\text{m}^3$ 逐步压缩到40亿 $\text{m}^3$ ,灌区实施了以节水为中心的全国大型灌区续建配套与节水改造工程建设。灌区引水量的缩减<sup>[1]</sup>和节水改造的实施,使得灌区水量分配发生改变,作为灌区主要水量消耗的农业耗水以及区域水土环境必然会受到影响,而农业耗水和水土环境与种植结构调整息息相关。作物种植结构包括对区域作物类型、品种、面积和种植模式等多项农业信息的综合,是农业和灌溉用水管理的重要依据<sup>[2-3]</sup>。

遥感技术的发展和运用,使农业用水管理和研究从沿用传统观念和方法的阶段进入到精准化和定量化新阶段,使农业研究从经验水平提高到理论水平<sup>[4]</sup>,成为及时掌握农业资源、作物生长、农业灾害等信息的最佳手段<sup>[5]</sup>。种植结构的识别需要提取生育期内植被长势的动态变化信息,由于云雨等气

象条件的干扰,单一遥感数据源往往不能满足实际应用,而数据融合可以有效解决这一问题,其目的在于互补不同时空分辨率数据源,生成包含高时间序列特征和高空间分布特征的影像。传统的融合算法包括亮度-色调-饱和度变换<sup>[6]</sup>、主成分分析<sup>[7]</sup>以及小波变换<sup>[8]</sup>等,将全色波段与多光谱波段进行融合以获得高分辨率多光谱图像,但不能有效获取由物候引起的地表反射率变化;GAO等<sup>[9]</sup>提出了时空自适应融合算法(STARFM),算法综合考虑了距离权重、光谱权重和时间权重,有效融合了Landsat和MODIS数据,但该方法在缺少关键期影像时,不能有效捕捉物候剧烈变化信息;HIKER等<sup>[10]</sup>提出了一种时空自适应融合变化监测方法,该方法避免了短暂剧烈的地物变化问题;ROY等<sup>[11]</sup>采用一种半物理的数据融合方法,使用MODIS二性反射等地表数据产品和Landsat ETM+进行融合并预测对应日期或前后相邻日期的数据;ZHU等<sup>[12]</sup>提出了增强时空自适应融合算法(ESTARFM),在相似像元选取和时间权重计算上更加合理,并且可以有效捕捉地物剧烈变化特征。

归一化差值植被指数 (NDVI) 根据植被在红光和近红外波段的反射特性的不同,通常用来监测植被的生长状况及作物分类。闫慧敏等<sup>[13]</sup>利用 AVHRR/NDVI 数据,采用峰值特征点结合作物生长季相特征提取了农田多熟种植信息;徐美等<sup>[14]</sup>利用中巴卫星,根据不同时期 NDVI 阈值提取了青铜峡灌区主栽作物;黄青等<sup>[15]</sup>在 MODIS/NDVI 数据基础上,根据主要作物时序光谱特征建立了种植结构提取模型,并获取了东北地区作物空间格局特征。蔡学良等<sup>[2]</sup>融合 Landsat ETM + 与 MODIS/NDVI 数据,结合作物系数变化规律,运用光谱耦合技术提取作物种植结构,实现了漳河灌区作物的分类。郝卫平等<sup>[16]</sup>根据 Landsat7 ETM + 与 MODIS/NDVI 数据,结合地面实体作物 NDVI 变化曲线,运用光谱耦合技术实现了东北三省作物分布信息。

对种植结构信息的提取及应用大多局限于某一特定年份,其历史变化、空间分布特征以及与农田水土环境因子之间的相互关系研究不多见。本文将 ESATRFM 融合算法应用到研究区域,构建高时空地表数据集,结合地面实体作物 NDVI 变化曲线、ISODATA 非监督分类方法、光谱耦合技术以及 Google Earth 工具实现多年种植结构的提取,并在此基础上分析河套灌区解放闸灌域多年种植结构时空特征变化及其与水土环境因子之间的相关关系。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究区概况

以河套灌区解放闸灌域为研究对象(图1)。解放闸灌域(106°43′~107°27′E,40°34′~41°14′N)为河套灌区第二大灌域,地处干旱半干旱内陆地区,海拔高度为1030~1046 m,年平均降雨量151 mm,年均蒸发量(20 cm 蒸发皿)达2300 mm,年内平均气温9℃。灌域总土地面积约2345 km<sup>2</sup>,其中60%以上为耕地,土壤类型为潮灌淤土和盐化土,粮食作物以夏玉米和春小麦为主,经济作物以向日葵为主<sup>[17]</sup>。

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 遥感影像及数据预处理

采用的 Landsat7 ETM + 和 MOD09GA 产品数据来源于 USGS 官网(<http://glovis.usgs.gov/>),空间分辨率分别为30 m和500 m,数据年际跨度为2000—2015年,年内跨度为4—10月份。影像经筛选为晴空或少量云覆盖,数据清单见表1。Landsat7 ETM + 影像经过辐射、大气校正、条带修复、镶嵌和裁剪,并利用手持GPS采集的地面控制点统一进行几何精校正,误差控制在半个像元以内。MOD09GA

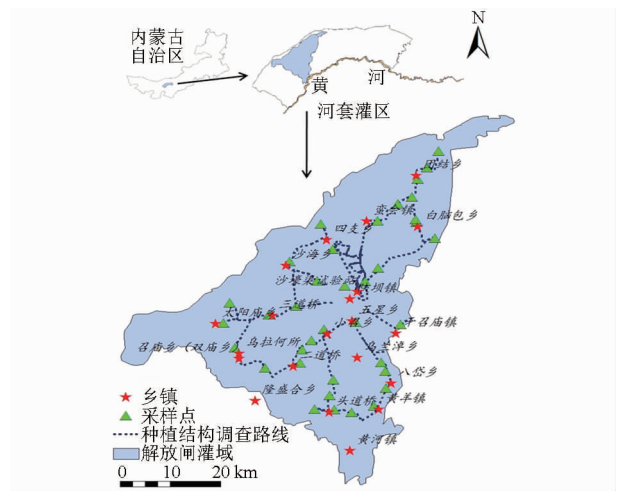


图1 解放闸灌域及种植结构调查路线

Fig. 1 Jiefangzha irrigation district and ground truth survey routes

标准陆地产品已经过辐射、大气和几何校正,通过MRT工具重投影到WGS84/UTM(北48区)坐标系,空间分辨率重采样到30 m,与Landsat7 ETM + 相同。

受云量和天气影响,单一Landsat7影像不能满足对作物生育期NDVI变化特征的提取,因此采用ESATRFM数据融合算法对Landsat7与MODIS数据进行融合,生成生育期内每16 d 30 m 遥感影像。

表1 遥感影像资料

Tab. 1 Data of available remote sensing images

年份	产品日序	
	Landsat7 ETM + (编号 129031/129032)	MOD09GA (编号 h26v04)
2000	83,163,195,243,291	83,113,127,143,163,173, 195,207,216,243,258,268,291
2002	72,136,232,280	72,113,130,136,157,174, 187,205,217,232,248,268,280
2005	208,224	114,128,147,161,173,193, 208,224,238,256,274
2008	153,201,249,297	107,121,139,153,170,184, 197,217,235,249
2010	174,190,238,254	113,126,142,156,174,190, 205,220,238,254,269,281
2015	124,156,204,236, 252,268	111,124,139,156,173,191, 218,236,256,268,282

#### 1.2.2 地面调查数据

分组在解放闸灌域进行地面实际调查,手持GPS获取调查点经纬度,通过ODK Collect软件载入照片和调查内容,包括作物类型、作物种植密度、作物面积比例和作物长势等。调查样方面积为90 m × 90 m,每个样点东、南、西、北4个方位各拍一幅照片,以辅助后期地面位置精度验证。最后完成地面调查点共215个,覆盖研究区域各个乡镇,调查路线

见图1。

### 1.3 ESTARFM 数据融合

ESATRFM 数据融合算法可以有效互补不同遥感数据源的优势以生成适宜的时间和空间分辨率影像。该算法考虑了临近像元与目标像元之间的光谱距离权重、空间距离权重和时间距离权重,通过临近相似像元的光谱信息来预测目标像元的辐射值。算法利用与预测时期相邻2个时期的高分辨率影像和低分辨率影像以及预测时期低分辨率影像共同生成预测时期的高分辨率影像。最终预测时期高分辨率影像的计算式为

$$F_k(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_k) + \sum_{i=1}^N [W_i V_i (C(x_i, y_i, t_p) - C(x_i, y_i, t_k))] \quad (k=m, n) \quad (1)$$

$$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = T_m F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) + T_n F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) \quad (2)$$

式中  $w$ ——相似像元搜索窗口大小

$(x_{w/2}, y_{w/2})$ ——中心像元位置坐标

$(x_i, y_i)$ ——第  $i$  个相似像元坐标

$W_i$ ——综合权重因子,包括光谱距离权重和空间距离权重

$V_i$ ——转换系数

$T_m, T_n$ —— $t_m$  和  $t_n$  时期的时间权重因子

$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_k)$ 、 $C(x_i, y_i, t_k)$  表示  $k$  时期高分辨率影像和低分辨率影像;  $F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p)$ 、 $F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p)$  表示  $t_m$  和  $t_n$  时期高、低分辨率影像共同预测的  $t_p$  时期高分辨率影像;  $F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p)$  表示最终预测时期高分辨率影像。  $T_m$  和  $T_n$  表达式为

$$T_k = \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w C(x_j, y_i, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w C(x_j, y_i, t_p) \right|} \sum_{k=m, n} \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w C(x_j, y_i, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w C(x_j, y_i, t_p) \right|} \quad (3)$$

具体计算过程参照文献[12]。

### 1.4 ISODATA 非监督分类及光谱耦合技术

由于人力和物力因素的限制,不能提供足够的地面先验信息,对包含时间系列数据的宏影像(由 ETM+ 可见光、近红外波段和 NDVI 时间序列波段组成)分类一般采用 ISODATA 聚类分析方法,将具有相似光谱反射特性以及变化特征的像元归类合并为若干类,并统计各个类别的光谱反射特征矩阵。

光谱耦合技术 SMT (Spectral matching technique) 广泛应用于高光谱遥感信号解译中,其基

本原理是比较多光谱曲线与已知特征曲线的相似度,从而对研究对象与目标进行分类<sup>[2,16,18]</sup>。生育期内 NDVI 时间序列变化与高光谱具有类似的特性,因此用 NDVI 时间序列取代了光谱波段。光谱相似度 SSV 可以用来度量2个光谱间的差异,光谱相似度主要表现在形状和数量级相似两方面。其表达式为

$$S_{SV} = \sqrt{d_e^2 + \hat{r}^2} \quad (4)$$

$$\text{其中 } d_e = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - Y_i)^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{1}{n_2 - 1} \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (t_i - \mu_t)(h_i - \mu_h)}{\sigma_t \sigma_h} \quad (6)$$

$$\hat{r}^2 = 1 - r^2 \quad (7)$$

式中  $d_e$ ——欧氏距离,表示度量光谱间数量级

$\hat{r}$ ——度量光谱的形状差异

$n_1, n_2$ ——类别 NDVI 时间序列长度

$X, Y$ ——类别 NDVI 时间序列

$r$ ——皮尔逊相关系数,取  $[-1 \sim 1]$ , 其值越大越好

$t_i$ ——已知类 NDVI 时间序列值

$\mu_t$ ——已知类 NDVI 时间序列均值

$h_i$ ——目标类 NDVI 序列值

$\mu_h$ ——目标类时间序列均值

$\sigma_t$ ——已知类系列的标准差

$\sigma_h$ ——目标类标准差

## 2 结果与分析

### 2.1 数据融合结果及分析

采用 ESATRFM 算法分别对多年遥感影像(2000、2002、2005、2008、2010、2015年)进行了融合。受篇幅限制,本文仅显示解放闸灌域范围内像元2000年7月13日和2015年7月23日预测影像(1000像元×1000像元)和分析结果, Landsat7 ETM+ 及 MOD09GA 影像见图2。

图3a为2000年7月13日融合结果,从左到右依次为:实际影像(Landsat7 ETM+ 7月13日)红、近红外波段计算所得 NDVI 图像;同期预测影像(由 Landsat7 ETM+ 6月11日、8月30日和 MOD09GA 6月11日、7月13日和8月30日5景影像共同预测)生成的 NDVI 图像;实测值与预测值相关性分析;差值直方图。预测影像 NDVI 在空间差异性和分布上与实际影像一致,在30m分辨率尺度能够反映空间差异,高灰度代表植被区域,低灰度代表非植被区域。从相关性来看,其散点值分布在  $y = x$  线附

Landsat7 ETM+	MOD09GA	Landsat7 ETM+	MOD09GA
2000/03/23	2000/03/23		
	2000/04/22		2015/04/21
	2000/05/06	2015/05/04	2015/05/04
	2000/05/22		2015/05/19
2000/06/11	2000/06/11	2015/06/05	2015/06/05
	2000/06/21		2015/06/22
2000/07/13	2000/07/13		2015/07/10
	2000/07/25	2015/07/23	2015/07/23
	2000/08/03		2015/08/06
2000/08/30	2000/08/30	2015/08/24	2015/08/24
	2000/09/14	2015/09/09	2015/09/13
	2000/09/24	2015/09/25	2015/09/25
2000/10/17	2000/10/17		2015/10/09

图2 2000年及2015年可用遥感影像

Fig. 2 Available remote sensing images in 2000 and 2015

近,相关系数达0.89,表明在空间分布上NDVI高低值变化一致。由差值直方图可知,NDVI实际值与NDVI预测值差值均值为0.004,标准偏差为0.104,预测结果良好。

图3b为2015年7月23日预测结果,从左到右依次为:实际影像(Landsat7 ETM+ 6月5日)计算所得NDVI图像;预测影像(由Landsat7 ETM+ 6月5日、8月24日和MOD09GA 6月5日、7月23日和8月24日5景影像进行预测)生成的NDVI图像;实测值与预测值相关性分析;差值直方图。预测结果与同期实际影像空间分布特征一致。实际影像与预测影像NDVI相关性达到0.81,差值均值为0.033,标准偏差为0.128,预测结果良好。

## 2.2 种植结构提取及精度评价

### 2.2.1 种植结构提取

以2015年Landsat7 ETM+数据为基础,将NDVI时间序列与之组合,生成包含30个波段的宏

影像(ETM+ 6×3个波段,分别为3个不同关键时期2015-06-05、2015-07-23、2015-08-24,每期影像中包含6个波段;NDVI时间序列12个波段,分别为2015-04-21、2015-05-04、2015-05-19、2015-06-05、2015-06-22、2015-07-10、2015-07-23、2015-08-06、2015-08-24、2015-09-13、2015-09-25、2015-10-09)。解放闸灌域宏影像数据借助ISODATA非监督分类算法分成50类,对各类别各时期NDVI平均值进行统计,生成类别均值NDVI变化曲线。结合Landsat7 ETM+关键期影像和地面点信息,水体、沙漠、居民点以及盐荒地等非耕地类别可以直接进行识别。对于混合类,由原始宏影像分离出该部分,重新划分为10个子类,逐一判别,直至所有类别均被识别。农田类别NDVI特征曲线与地面实体作物NDVI特征曲线(图4)采用光谱相似度进行分析、识别、合并。

农田类别中,第2、3、4类与玉米高度相关,相关系数分别达到0.98、0.98和0.97,类别自身也呈相关性,相关系数达到0.98。第7、8、9类与向日葵高度相关,相关系数分别达到0.96、0.99、0.98,类别自身相关性达到了0.96。第13、14类与小麦相关系数分别为0.83、0.78,类别自身相关性达到0.95,参照类别NDVI时序特征及Google Earth纹理特征,可以确定为小麦类。第15类与套种类相关性达到0.96。

解放闸灌域范围影像经非监督分类、人机交互识别、类别合并与判定,最终分为9大类。其中非耕地分为水体、居民区及建设用地、沙漠和盐荒地4类,农田分为玉米、向日葵、小麦、套种以及其他5类,主栽作物空间分布见图5。

### 2.2.2 精度评价

主栽作物的位置精度采用2015年7月地面实

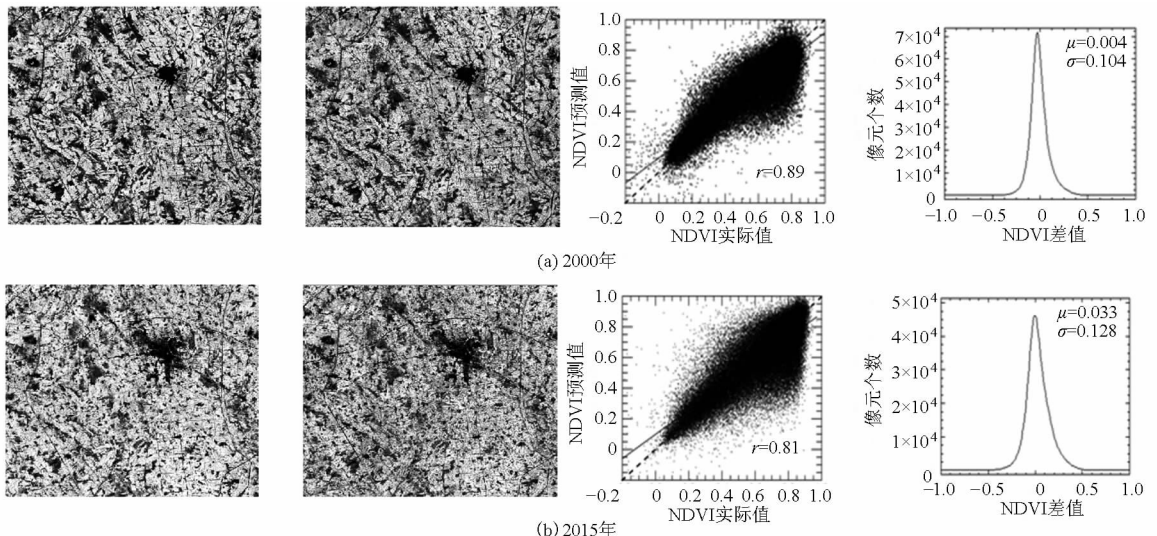


图3 遥感影像融合结果

Fig. 3 Actual images and predicted images produced by ESTARFM in 2000 and 2015

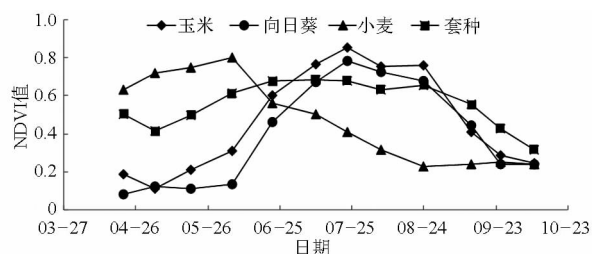


图 4 主要作物生育期 NDVI 平均值变化特征曲线

Fig. 4 Average of NDVI signature of different crops in growth period

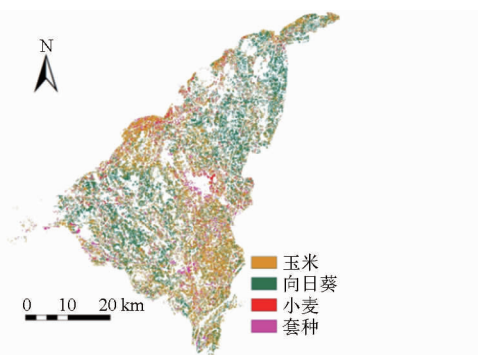


图 5 2015 年解放闸灌域主要作物分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of main crops in 2015

体采样点进行检验。在研究区范围内,137 个均匀分布的调查点参与了精度评估,与分类结果进行逐一对比,得到如表 2 所示的精度矩阵,其中行所在信息代表实地调查点作物类型,列所在信息代表分类结果,精度代表遥感解译结果的像元与地面采样点的位置匹配度。

表 2 遥感影像作物分类位置精度评估

Tab. 2 Accuracy assessment using ground truth data

样本点	作物	合计	样本数					精度/ %
			向日葵	玉米	小麦	套种	其他	
纯像元	向日葵	32	28	2	0	0	2	88
	玉米	21	0	20	0	1	0	95
	小麦	12	0	0	11	0	1	91
	套种	10	0	0	0	9	1	90
混合像元	向日葵	15	12	1	0	0	2	80
	玉米	30	1	26	2	0	1	87
	小麦	10	0	0	9	0	1	90
	套种	7	0	0	1	6	0	86

由于研究区域地块比较破碎,将样本点分为纯像元和混合像元,分别对其进行评估。纯像元中玉米、小麦和套种的分类精度分别达到了 95%、91% 和 90%, 均达到较高的精度;向日葵分类精度为 88%, 由于不同品种之间生理指标差异较大,光谱反射特性差异大,其 NDVI 特征变化曲线差异也较大,其识别精度会有所降低。其中纯像元分类总体精度达到了 91%, 高于混合像元的 86%。就整体而言遥感解译结果的分类精度较好,可以满足对研究区域

作物的识别。

对历史种植结构提取的评估,则以杭锦后旗行政区(1 790 km<sup>2</sup>,占灌域面积的 76.33%)为单位,与遥感监测结果进行总量上的对比分析。由图 6 可以看出,主栽作物玉米、小麦和套种种植面积的监测结果与统计数据(巴彦淖尔市统计年鉴)相一致,由于向日葵不同品种之间物理特性差异较大,遥感监测结果与统计数据在个别年份上相差较大。但不同作物遥感监测结果多年变化趋势与杭锦后旗统计数据较吻合。

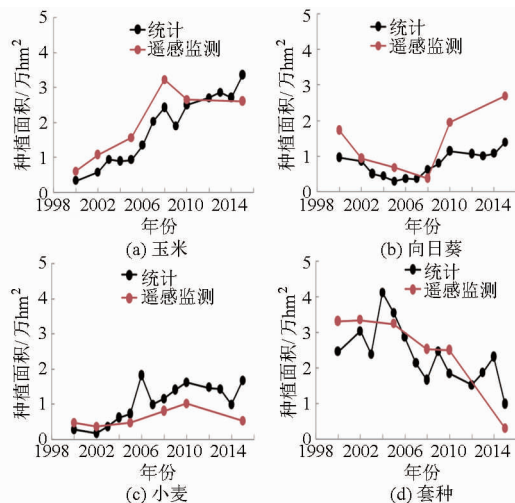


图 6 杭锦后旗主栽作物多年遥感监测与统计数据对比

Fig. 6 Comparison of main crops area between remote sensing and statistics in Hangjinhouqi district

## 2.3 种植结构时空变化规律及其与地下水相关性分析

### 2.3.1 种植结构时间变化

解放闸灌域灌溉面积为 14.20 万 hm<sup>2</sup>[19],以夏玉米、向日葵、春小麦和套种为主,其面积多年变化如图 7 所示。粮食作物玉米和小麦种植面积逐年增加,玉米种植面积增加尤为明显,由 2000 年的 0.83 万 hm<sup>2</sup>(占灌溉面积的 5.80%)增加到 2015 年的 4.02 万 hm<sup>2</sup>(占灌溉面积的 28.31%)。一方面出于国家对粮食作物的补贴政策,鼓励农户种粮;另一方面由于市场对粮食作物的需求不断增加,如对工业原料需求较大的玉米。经济作物向日葵的种植面积呈先减少后增加的趋势,其种植规模主要受市场需求因素影响。套种作为一种典型的高产种植模式,其种植面积近几年呈直线下滑趋势,由 2000 年的 4.30 万 hm<sup>2</sup>(占灌溉面积的 30.32%)减少到 2015 年的 0.41 万 hm<sup>2</sup>(占灌溉面积的 2.91%),随着土地承包和流转速度加快、农村劳动力的外流,加上套种种植模式劳动力成本较高,使得农户转向单一作物种植模式。

### 2.3.2 种植结构空间分布

受篇幅限制,对 2000、2005、2015 年种植

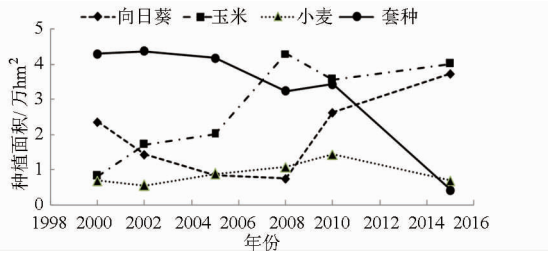


图7 解放闸灌域主要作物种植面积多年变化趋势

Fig.7 Trend of main crops area in Jiefangzha irrigation region from 2000 to 2015

结构空间分布特征进行分析,如图8所示。受作物类型、生理特征以及土壤、地下水等自然地理环境的影响,不同作物在空间上表现为不同的分布特征。

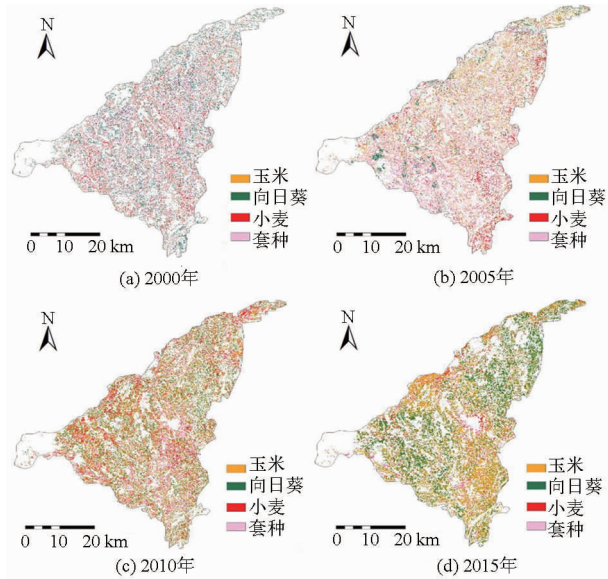


图8 2000、2005、2010、2015年不同作物空间分布

Fig.8 Spatial distribution maps of maize, sunflower, wheat and interplant in 2000, 2005, 2010 and 2015

小麦种植区域主要分布在灌域的东南部以及东部和北部的边缘区域。由2005、2010、2015年分布图可看出,玉米种植面积在灌域的北部、东南部和东北部地区分布较为密集,由于2000年玉米种植面积较少,其空间分布特征并不明显。向日葵种植区域在西部和东北偏中部地区分布较多,2005年向日葵种植面积偏小,为多年中面积最少,其整体变化趋势表现为先减少后增加。套种种植模式主要分布在东南部和西南部一些地区,其作为一种高产种植模式,近年来种植面积逐年减少,在2015年空间分布中其种植面积明显减少。

### 2.3.3 种植结构空间格局与地下水相关性分析

地下水埋深分布采用2000、2005、2010、2015年3月份数据,该月份为作物生育期前期和灌溉前期,地下水空间分布不受因灌溉和渗漏带来的影响。利用普通克里格插值法<sup>[20]</sup>对相关数据进行插值,见图9。随着大型灌区节水改造的实施,渠道衬砌率

和灌溉效率的提高,地下水位整体有所下降,2000、2005、2010、2015年地下水位平均值分别为1.76 m、2.00 m、2.17 m和2.33 m。其空间分布表现为,灌域西南部和东北偏中部区域地下水位埋深较浅,中部、东南部以及东北部地下水位埋深较深。

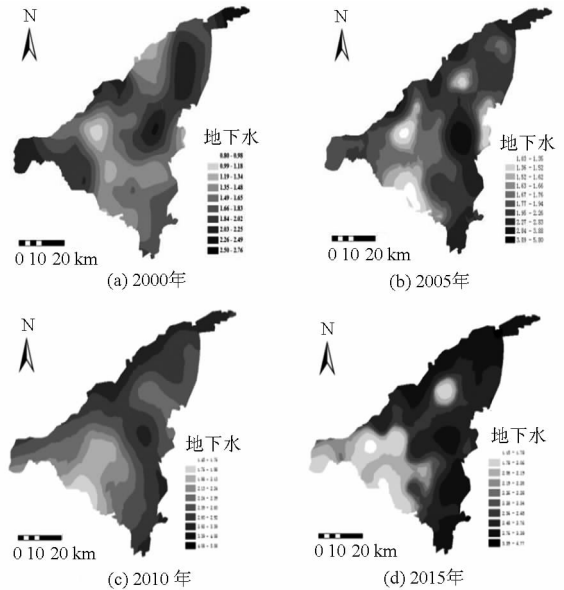


图9 2000、2005、2010、2015年3月份地下水分布

Fig.9 Spatial distribution maps of groundwater depth in March 2000, 2005, 2010 and 2015

研究区域蒸发强烈,盐分聚集在土壤表层,长期以来使得土壤发生不同程度的盐渍化,尤其在地下水位相对较浅的区域,其空间分布对作物的生长和适应性则有不同的影响和要求。结合种植结构空间分布可知,向日葵在地下水位埋深较浅的西南部分布较为集中;而玉米和小麦在地下水位埋深较大的中部和东南部分布较为集中,反映出不同作物对水土环境的适应性不同,向日葵的耐盐性较玉米、小麦高,更能适应盐碱化程度偏高的土壤,这与童文杰<sup>[21]</sup>对河套灌区作物耐盐性评价研究结果相一致,2005年和2015年尤为明显;套种种植模式同玉米、小麦相似,在埋深较大的中部、东南部以及西部部分地区分布密集。

从图9地下水分布可知,地下水位随时间表现为整体下降的趋势,但其空间的相对差异性并未发生明显的变化。结合图8种植结构多年变化,不同作物空间分布格局的相对差异性也并未随时间发生较大的改变,而是表现为与地下水埋深空间分布具有相似的特征。由于不同作物的耐盐性及其对水土环境的适应性不同,种植结构调整在一定程度上受地下水位和土壤盐渍化等水土环境的限制,其空间分布格局具有一定的必然性。研究结果同时也说明了该地区种植结构在区域分布上具有一定的合理性。

种植结构空间分布格局以及其与地下水空间分布的相关性,一方面可以为灌溉部门制定水量分配计划时提供决策支持,根据现有灌溉制度,合理配置水资源;另一方面在合理利用地下水资源以及治理水土环境上提供依据,尤其在地下水埋深较浅的西南区域,可以采取井渠结合以及非充分灌溉方式,以改善土壤盐碱环境。

## 2.4 灌区引黄灌溉与地下水位年际变化

自从黄河流域水资源实行统一调配及灌区节水改造工程实施以来,解放闸灌域净引水量有所减少,而灌域农田蒸散发量<sup>[22]</sup>并未减小,稳中有升,见图10。解放闸灌域历年种植结构有较大调整,尤其以高耗水作物玉米<sup>[23-24]</sup>种植面积变化幅度最大,逐年增加,而其他作物种植面积变化幅度次之。由于不同作物需水量不同,种植结构的调整对农田蒸散发量会产生直接的影响。结合灌域农田蒸散发量变化与种植结构调整情况可知,农田蒸散发量上升的变化趋势与高耗水作物玉米和小麦种植面积的增加有直接的关系。

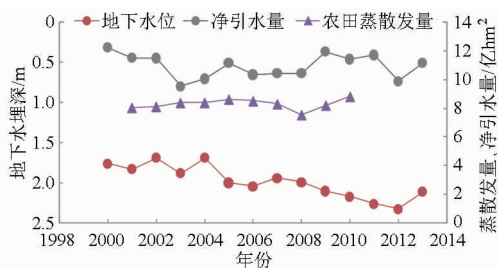


图10 解放闸灌域历年地下水位、净引水量及农田蒸散发量变化曲线

Fig. 10 Trend of groundwater depth, net water diversion and agricultural evapotranspiration in Jiefangzha irrigation region

灌区节水改造工程实施以来,渠道衬砌率不断完善,灌溉期普遍缩短,输配水过程渗漏量和蒸发量减小,灌溉水利用系数得到提高<sup>[25]</sup>;随着地下水渗漏的大幅减少,地下水水位下降(图10),由2000年的1.76 m下降到2015年的2.33 m,土壤盐碱化得到有效控制;大型干渠衬砌后,重度盐碱得到改善,渠堤两侧植被恢复,农田生态环境得到改善,反映出节水改造对灌域水循环和水土环境改善起到的积极影响。

## 2.5 讨论

以2015年实体作物NDVI特征变化曲线作为参考标准,对历史作物类型提取过程中,实体作物NDVI特征曲线一方面受作物生长状况影响,其影响因素包括品种、施肥、土壤环境、灌水时间等;另一方面受样本选取的影响。因此,在缺少高分辨率影像辅助判别和详细的地面调查信息情况下,类别归

类过程中不可避免会出现一些误判现象。

在种植结构调整与地下水埋深制约关系分析中,空间矿化度和盐分指标将更能直观的反映出区域盐碱化程度及其变化,相比单纯通过地下水位埋深空间分布更能有效说明种植结构空间格局分布特征。

种植结构调整将直接影响农田耗水的变化,本文定性分析了种植结构调整与农田耗水量变化的关系,由于未对不同作物实际耗水的历史变化进行定量分析,种植结构的调整对农田耗水量变化、灌区水资源转化以及实际节水潜力的影响需要做进一步的讨论和分析。

## 3 结论

(1)粮食作物玉米和小麦种植面积呈逐年增加,玉米变化幅度最大,由2000年的0.83万 $\text{hm}^2$ (占比5.80%)增加到2015年的4.02万 $\text{hm}^2$ (占比28.31%),其变化受国家政策和市场因素影响,如粮补政策、价格导向和需求等。经济作物向日葵种植面积由下降变为上升趋势,其种植规模由市场需求和价格因素主导。套种模式种植面积逐年下降,由2000年的4.30万 $\text{hm}^2$ (占比30.32%)减少到2015年的0.41万 $\text{hm}^2$ (占比2.91%),其规模的减小原因主要为土地承包和流转速度加快、农村劳动力的外流,加上套种种植模式劳动力成本较高,使得农户转向单一作物种植模式。

(2)种植结构虽有较大调整,但其空间分布格局的相对差异性并未发生明显变化,小麦种植区域主要分布在灌域的东南部以及东部和北部的边缘区域,玉米在灌域的北部、东南部和东北部地区分布较为密集,向日葵种植区域在西部和东北偏中部地区分布较多,套种种植模式主要分布在东南部和西南部一些地区。

(3)地下水埋深整体下降,由2000年的1.76 m下降到2015年的2.33 m,但其空间分布的相对差异并未随时间发生明显变化,东南部、东北部以及中部地区地下水埋深较大,西南部和东北靠中部地区地下水埋深相对较浅。向日葵在地下水埋深较浅、盐碱化程度偏高的区域分布集中,玉米、小麦及套作在埋深大、盐碱化偏弱的区域分布较集中。种植结构这种空间分布一方面受地下水位和土壤盐渍化等水土环境的制约,另一方面与作物生理特征密切相关。研究结果同时也表明了该地区种植结构在区域分布上具有一定的合理性。

(4)在净引水量减小的情况下,解放闸灌域农田蒸散发量并未减少,略有上升的变化趋势,这与高



耗水作物玉米种植面积的增加有直接的关系。而灌区地下水位的整体下降以及灌溉水利用系数的提高,表明了灌区节水改造工程实施以来的积极效果,输配水过程水量损失减小,对地下水补给量减小,土壤盐碱化得到有效控制,农田生态环境得到改善。

## 参 考 文 献

- 1 屈忠义, 杨晓, 黄永江. 内蒙古河套灌区节水工程改造效果分析与评估[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):70-76.  
QU Zhongyi, YANG Xiao, HUANG Yongjiang. Analysis and assessment of water-saving project of Hetao irrigation district in Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):70-76. (in Chinese)
- 2 蔡学良, 崔远来. 基于异源多时相遥感数据提取灌区作物种植结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8):124-130.  
CAI Xueliang, CUI Yuanlai. Crop planting structure extraction in irrigated areas from multi-sensor and multi-temporal remote sensing data[J]. 2009, 25(8):124-130. (in Chinese)
- 3 李荣, 郭萍. 基于双层分式规划的种植结构多目标模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9):168-174.  
LI Mo, GUO Ping. Multi-objective optimization model of planting structure based on two-level fractional programming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):168-174. (in Chinese)
- 4 邢素丽, 张广录. 我国农业遥感的应用现状与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6):174-179.  
XING Suli, ZHANG Guanglu. Application status quo and prospect of agriculture remote sensing in China [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6):174-179. (in Chinese)
- 5 史舟, 梁宗正, 杨媛媛. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):247-260.  
SHI Zhou, LIANG Zongzheng, YANG Yuanyuan. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):247-260. (in Chinese)
- 6 CARPER W J, LILLES T M, KIEFER R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56:459-467.
- 7 SHETTIGARA V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58:561-567.
- 8 YOCKY D A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62:1067-1074.
- 9 GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance; predicting daily Landsat surface reflectance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8):2207-2218.
- 10 HIKER T, WULDER M A, COOPS N C, et al. A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest based on Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8):1613-1627.
- 11 ROY D P, JU J, LEWIS P, et al. Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6):3112-3130.
- 12 ZHU X L, CHEN J, GAO F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11):2610-2623.
- 13 闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远, 等. 基于多时相遥感信息的中国作物种植结构空间格局研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4):85-90.  
YAN Huimin, CAO Mingkui, LIU Jiyuan, et al. Characterizing spatial patterns of multiple cropping system in China from multi-temporal remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(4):85-90. (in Chinese)
- 14 徐美, 阮本清, 黄诗峰, 等. 灌区作物种植结构遥感监测及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(7):879-885.  
XU Mei, RUAN Benqing, HUANG Shifeng, et al. Monitoring of crop variety distribution by remote sensing and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):879-885. (in Chinese)
- 15 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.  
HUANG Qing, TANG Huajun, ZHOU Qingbo, et al. Remote sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):218-223. (in Chinese)
- 16 郝卫平, 梅旭荣, 蔡学良, 等. 基于多时相遥感影像得东北三省作物分布信息提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):201-207.  
HAO Weiping, MEI Xurong, CAI Xueliang, et al. Crop planting extraction based on multi-temporal remote sensing data in Northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):201-207. (in Chinese)
- 17 荏伟伟. 基于分布式水温模型的灌区用水效率评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.  
CHI Weiwei. Water use performance for irrigation area based on distributed hydrological model [D]. Beijing:China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- 18 HONAYOUNI S, ROUX M. Material mapping from hyperspectral images using spectral matching in urban area [C] // IEEE Workshop in Honor of Prof Landgrebe, 2003.
- 19 赵云, 白京燕, 张金丽, 等. 解放闸灌域水资源供需趋势分析及综合利用配置[J]. 内蒙古水利, 2011(3):58-60.

- 20 杜军, 杨培玲, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):26-31.  
DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7):26-31. (in Chinese)
- 21 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.
- 22 YANG Y T, SHANG S H, JIANG L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of north China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164:112-122.
- 23 石贵余, 张金宏, 姜谋余. 河套灌区灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(5):72-76.  
SHI Guiyu, ZHANG Jinhong, JIANG Mouyu. Research of crop irrigation scheduling for hetao irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(5):72-76. (in Chinese)
- 24 付国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1):54-58.  
FU Guobin, LI Lijuan, YU Jingjie, et al. Estimation of water-saving potential in the hetao irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1):54-58. (in Chinese)
- 25 蒋磊, 杨雨亭, 尚松浩. 基于遥感蒸散发的干旱区灌区灌溉效率评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20):95-101.  
JIANG Lei, YANG Yuting, SHANG Songhao. Evaluation on irrigation efficiency of irrigation district in arid region based on evapotranspiration estimated from remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20):95-101. (in Chinese)

## 欢迎订阅 2017 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版是由农业部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学; 耕作栽培·生理生化·农业信息技术; 植物保护; 土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境; 园艺; 贮藏·保鲜·加工; 畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院(所)、大专院校的科研、教学与管理人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊, 影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992—2014 年连续 7 次遴选的核心期刊, 位居《中文核心期刊要目总览》“农业综合类核心期刊表”的首位。1999—2008、2013—2014 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助; 2015 年获“中国科协精品科技期刊工程项目”资助。1999 年获“首届国家期刊奖”, 2003、2005 年获“第二、三届国家期刊奖提名奖”; 2002—2015 年先后 13 次被中国科学技术信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号; 2009 年获中国期刊协会/中国出版科学研究院“新中国 60 年有影响力的期刊”称号; 2010、2013 年荣获“第二、三届中国出版政府奖期刊提名奖”, 2013 年获新闻出版广电总局“百强科技期刊”称号; 2012、2013、2014、2015 年获清华大学图书馆等“2012、2013、2014、2015 中国最具国际影响力学术期刊”称号。

《中国农业科学》中文版大 16 开, 每月 1、16 日出版, 国内外公开发行人。每期 208 页, 定价 49.50 元, 全年定价 1188.00 元。国内统一连续出版物号: CN11-1328/S, 国际标准连续出版物号: ISSN 0578-1752, 邮发代号: 2-138, 国外代号: BM43。

《中国农业科学》英文版(Agricultural Sciences in China, ASA), 2002 年创刊, 月刊。2012 年更名为《农业科学学报》(Journal of Integrative Agriculture, JIA)。2006 年 1 月起与国际著名出版集团 Elsevier 合作, 全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2009 年被 SCI 收录, 2015 年 JIA 影响因子为 0.724。2016 年获“中国科技期刊国际影响力提升计划”第二期项目 B 类期刊资助。

JIA 大 16 开, 每月 20 日出版, 国内外公开发行人。每期 180 页, 国内订价 80.00 元, 全年 960.00 元。国内统一连续出版物号: CN 10-1039/S, 国际标准连续出版物号: ISSN 2095-3119, 邮发代号: 2-851, 国外代号: 1591M。

《中国农业科学》中、英文版均可通过全国各地邮局订阅, 也可向编辑部直接订购。

邮编: 100081; 地址: 北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话: 010-82109808, 82106281, 82105098; 传真: 010-82106247

网址: www.ChinaAgriSci.com; E-mail: zgnykx@caas.cn

联系人: 林鉴非