

# 实际灌溉面积遥感监测技术 及其在江苏省灌区示范应用分析

宋文龙<sup>1</sup>, 刘 军<sup>2</sup>, 卢奕竹<sup>1</sup>, 仝道斌<sup>2</sup>, 叶 茂<sup>1,2</sup>, 王 瑞<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 江苏省宿迁市宿城区水利局, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 总结实际灌溉面积监测技术研究进展, 分析了江苏省灌区监测实际灌溉面积面临的问题及难点; 介绍了一种灌区多尺度实际灌溉面积遥感监测关键技术方法, 并以宿迁灌区、船行灌区为例阐述了这一方法的合理性、适用性, 提出应用该方法提高江苏省各地灌区实际灌溉面积监测精度与效率的建议, 可为江苏灌区管理提供关键技术支撑。

**关键词:** 实际灌溉面积; 作物种植结构; 光谱匹配; 南方灌区; 水稻

**中图分类号:** S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2024)05-0005-0006

## Analysis of remote sensing monitoring technology for actual irrigated area and its demonstration application in irrigation areas of Jiangsu Province

SONG Wenlong<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, LU Yizhu<sup>1</sup>, TONG Daobin<sup>2</sup>, YE Mao<sup>1,2</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Water Resources Bureau of Sucheng District, Suqian City, Jiangsu Province, Suqian 223800, China)

**Abstract:** On the basis of summarizing the research progress of monitoring technology of actual irrigated area, the problems and difficulties in monitoring actual irrigated area in Jiangsu Province were analyzed. This paper introduces a key technology method of remote sensing monitoring of multi-scale actual irrigated area in Jiangsu Province, and takes Suqian Irrigation area and Chuanhang irrigation area as examples to illustrate the rationality and applicability of this method, and puts forward suggestions to improve the monitoring accuracy and efficiency of actual irrigated area in Jiangsu Province, providing key technology support for the management of Jiangsu irrigation area.

**Key words:** actual irrigated area; crop planting structure; spectral matching; south irrigation area; rice

实际灌溉面积是灌区实施农业节水的重要参考数据, 实现其大范围精准监测与数据分析是灌区管理关心的重要内容。准确掌握实际灌溉面积、空间分布及其变化信息对灌区作物结构调整、灌溉信息化管理、水资源优化配置、干旱监测和应急减灾均具有重要意义<sup>[1]</sup>。当下在灌区用水管理中, 灌溉面积数据主要通过调查统计或根据用水量与灌溉定额简单计算得到, 时效性差、准确性不高、缺失空间信息。卫星遥感技术具有大范围、多尺度、周期性、定量化等优势, 为灌区灌溉面积动态精准监测

提供了技术手段。

## 1 实际灌溉面积监测技术研究进展

实际灌溉面积指某一时间尺度内实际进行过灌溉的耕地面积, 根据时间尺度可以分为生长季灌溉面积、年度灌溉面积、灌溉亩次等。调查统计或根据用水量与灌溉定额简单计算是灌区获取实际灌溉面积的传统方式, 这种方法耗时费力、时效性差且准确性不高<sup>[2]</sup>。随着卫星遥感、无人机低空遥感等现代信息技术的快速发展, 遥感数据的种类愈

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021081)

作者简介: 宋文龙(1983—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事农业灌溉技术研究工作。E-mail: songwl@iwhr.com

加丰富,时间与空间分辨率均得到了大幅提高。遥感技术为灌区获取大范围高效可靠的空间数据奠定了基础,能够弥补传统方法的不足,是灌区大范围动态信息获取的唯一可能途径。2006年,世界水资源管理所(IWMI)提出了以面向对象的光谱匹配技术为主的一套方法,获得了第一幅基于遥感技术、空间分辨率为10 km的全球灌溉区域图。目前,实际灌溉面积遥感监测研究方法主要分为三类:一是光谱匹配技术,该方法根据植被指数时序曲线,通过相似性数学方法,进行地物类型及其特征判断与识别<sup>[3-5]</sup>;二是遥感指数阈值法,该方法通过引入能够表征灌溉引起土壤含水量、植被生长状况或其表层温度变化的遥感指数,设定相关阈值对未灌溉区域和灌溉区域进行区分<sup>[6-8]</sup>;三是机器学习方法,该方法通过计算机智能算法从数据中自动学习规律和模式,并根据这些规律和模式进行预测和决策<sup>[9]</sup>。各种机器算法和模型虽然在某些方面表现很好,但一般不具有较高普适性,对于地物状况较复杂的地区,很难保障较高精度,对数据源和样本要求也比较高。

## 2 江苏省内灌区实际灌溉面积监测现状

江苏省地处中国大陆东部沿海地区中部,属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带的气候过渡地带,雨量充沛、降水集中,云雨天气影响遥感影像质量,尤其是对光学影像影响较大,造成灌区有效影像数量不足。目前基于光学卫星影像时间序列的南方作物灌溉面积提取研究相对较少。

江苏省内灌区在灌溉管理中仍主要依赖传统的实地调研、统计上报、专家经验等方式获取实际灌溉面积,或通过灌溉水量和灌溉定额估算实际灌溉面积,方法相对简单,但时效性差、耗费人力物力、更新周期长、空间信息缺失,结果精度依赖于统计数据的准确性,更无法为灌区管理者提供灌溉过程中的实际灌溉面积信息,难以获取农民自主灌溉的情况。目前,江苏省内各灌区普遍缺少快速识别灌溉过程中实际灌溉面积及其变化情况的方法,难以满足灌区现代化管理的需求。

江苏省灌区多以种植水稻为主,目前实际灌溉面积遥感监测技术方法有很多,但各方法应用在江苏省灌区都存在一定的局限性。面向对象的光谱匹配法方法多以MODIS为数据源,时间分辨率高,容易获取植被指数时间序列,但空间分辨率相对较低,虽然能够识别不同种类作物的生长季灌溉面

积,但无法获取灌溉期间的灌溉次数和累计灌溉面积;高分辨率遥感影像时间分辨率低,云雨天气易造成作物关键生育期影像缺失,影响光谱匹配技术应用。垂直干旱指数(PDI)、改进垂直干旱指数(MPDI)、温度植被干旱指数(TVDI)等反映土壤含水量或者植被含水量大小的遥感指数在植被覆盖度较高的区域反演能力有限,水稻分蘖期后植被覆盖度增加,导致以上方法精度降低,且容易受云雨天气影响,难以获取连续的监测数据<sup>[10]</sup>;决策树模型、人工神经网络算法、随机森林等机器学习方法普适性不高,对于地物状况较复杂的地区很难有较高的精度,对数据源要求也比较高,并且也无法获取灌溉期间的灌溉次数和灌溉亩次,无法快速获取识别结果对灌溉过程进行监控。

## 3 灌区多尺度实际灌溉面积遥感监测关键技术

针对实际灌溉面积遥感监测研究存在的问题,提出了灌区多尺度实际灌溉面积遥感监测关键技术(图1)。该技术融合了不同时空分辨率遥感数据源优势,集成应用数据融合、像元尺度光谱匹配、热惯量法等算法,基于像元尺度光谱匹配的实际灌溉面积遥感监测方法和基于地表温度日较差的灌溉亩次遥感监测方法,实现对一次、生长季、全年、多年等不同时间尺度灌溉面积的快速动态遥感监测,得到国家重大研发计划、世界银行项目等的支持,在新疆三屯河灌区、陕西东雷抽黄灌区、河北石津灌区、内蒙河套灌区等开展了技术示范应用,取得发明专利4项、SCI/EI文章8篇,入选2020年度《水利先进实用技术重点推广指导目录》,获2021年江苏省水利科技进步二等奖等。

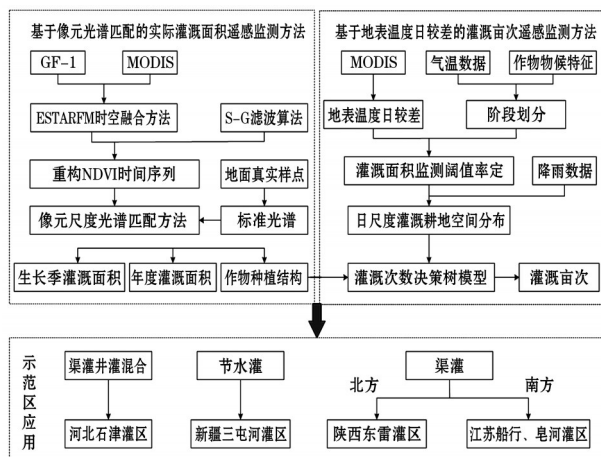


图1 技术路线

### 3.1 基于像元尺度光谱匹配的实际灌溉面积遥感监测方法

NDVI时序曲线可以有效反映不同作物类型在雨养和灌溉条件下的差异,体现在植被指数时序曲线的峰值大小、波动趋势和波动幅度等方面。通过光谱匹配法可以量化NDVI时序曲线之间的相似度,进而实现对作物年度、生长季灌溉面积和作物类型的识别,但南方灌区云雨天气容易造成作物关键生育期高分辨率遥感影像缺失,削弱NDVI时序曲线特征的差异,导致利用高分辨率遥感影像无法有效区分灌溉作物。提出了基于像元尺度光谱匹配的实际灌溉面积遥感监测方法,以GF-1、Sentinel-2等高分辨率多光谱卫星影像为数据源,通过ESTARFM时空融合算法和Savitzky-Golay滤波算法针对作物关键生育期重构NDVI时间序列,建立灌溉作物标准光谱库,应用像元尺度光谱匹配技术实现了年度灌溉面积、生长季灌溉面积和作物种植结构的监测识别,能够有效区分实际灌溉面积和雨养面积<sup>[11-12]</sup>。

### 3.2 基于地表温度日较差的灌溉亩次遥感监测方法

水体比热容大,地表温度日较差小,而灌溉会显著增大耕地的土壤含水量,导致受灌溉耕地的地表温度日较差远小于未灌溉耕地。基于地表温度日较差的灌溉亩次遥感监测方法以MODIS为数据源,根据作物物候特征及气候温度变化,分阶段率定地表温度日较差阈值,利用气象数据剔除降雨影响,并结合灌区灌溉周期、作物种植结构遥感识别结果建立灌溉次数决策树模型,获取作物的灌溉次数、灌溉时间和灌溉亩次。该方法不受作物植被覆盖度变化影响,时间分辨率可达日尺度,能监测作

物整个生育期的灌溉信息,结合基于像元尺度光谱匹配的实际灌溉面积遥感监测方法可实现作物灌溉全过程的多尺度协同监测。

### 3.3 基于无人机与宇宙射线中子法的验证技术方法

基于无人机与宇宙射线中子法(COSMOS)的作物类型与灌溉面积验证技术(图2),是基于COSMOS对土壤含水量变化敏感的优势,通过捕捉土壤水监测结果突然升高的特征监测灌溉,并利用无人航拍识别作物类型,与遥感识别进行对比分析,实现作物类型与日尺度灌溉面积动态识别结果的精度评估。

## 4 技术示范应用效果分析

### 4.1 船行灌区

基于GF-1、Sentinel-2、MODIS卫星数据,通过灌区多尺度实际灌溉面积遥感监测关键技术获取了2020年和2022年江苏省宿迁市船行灌区主要作物种植结构、灌溉次数时空分布图,如图3、图4和图5所示。遥感监测结果显示,船行灌区主要种植水稻、小麦、玉米和果树,种植模式以水稻小麦轮作和小麦玉米轮作为主,水稻小麦轮作主要分布在埧子镇、罗圩镇、南蔡乡、龙河镇、洋北镇,玉米小麦轮作主要种植在三棵树乡和陈集镇,而果树种植面积明显减少,遥感识别的作物空间分布特征与调研情况一致。2020年和2022年实际灌溉面积分别为1.65万hm<sup>2</sup>和1.55万hm<sup>2</sup>,主要以灌溉7次和8次为主,灌溉亩次分别为16.64万hm<sup>2</sup>次和17.22万hm<sup>2</sup>次。利用2020年10月野外勘察获取的149个样本点通过混淆矩阵方法对2020年实际灌溉面积遥感

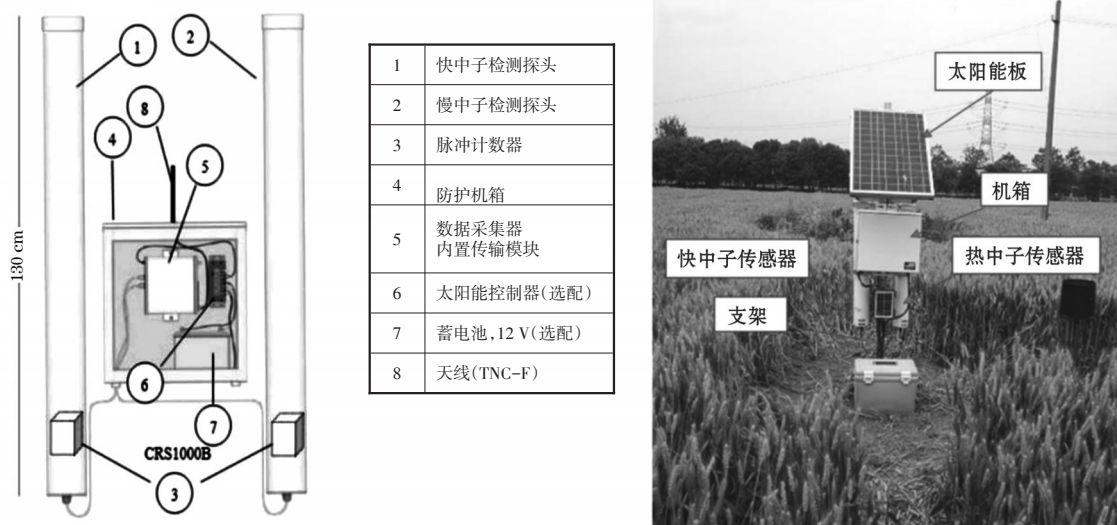


图2 宇宙射线土壤水分观测系统(COSMOS)



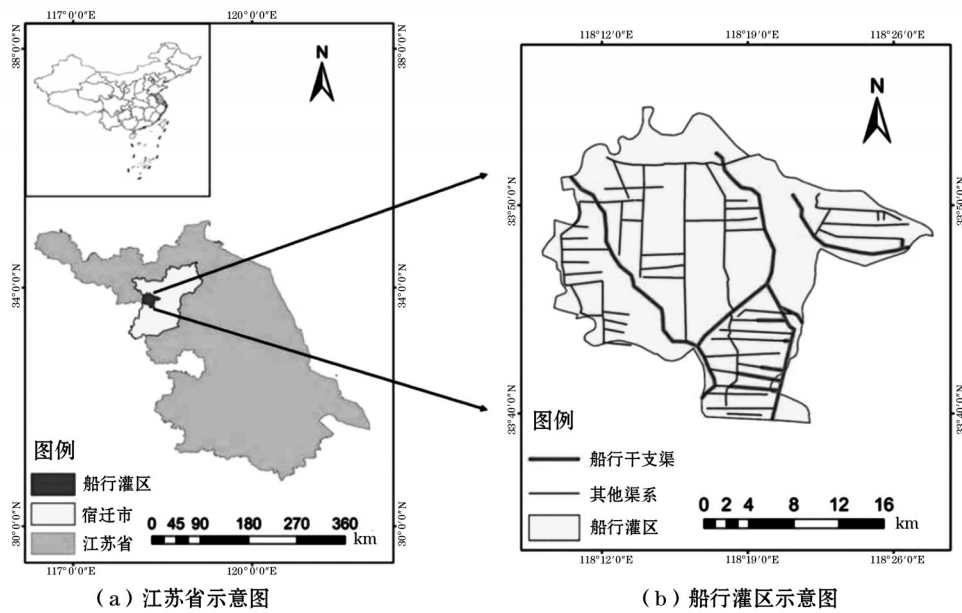


图3 船行灌区位置

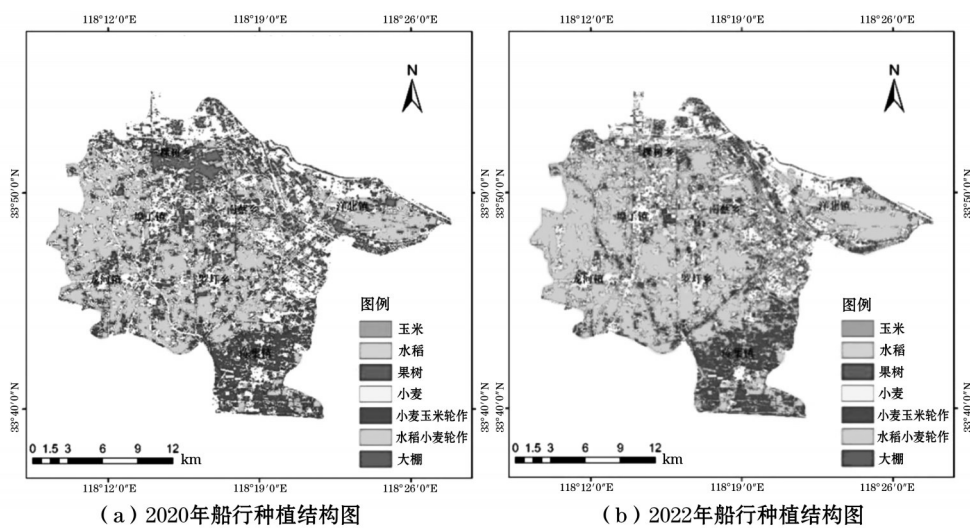


图4 船行灌区种植结构分布

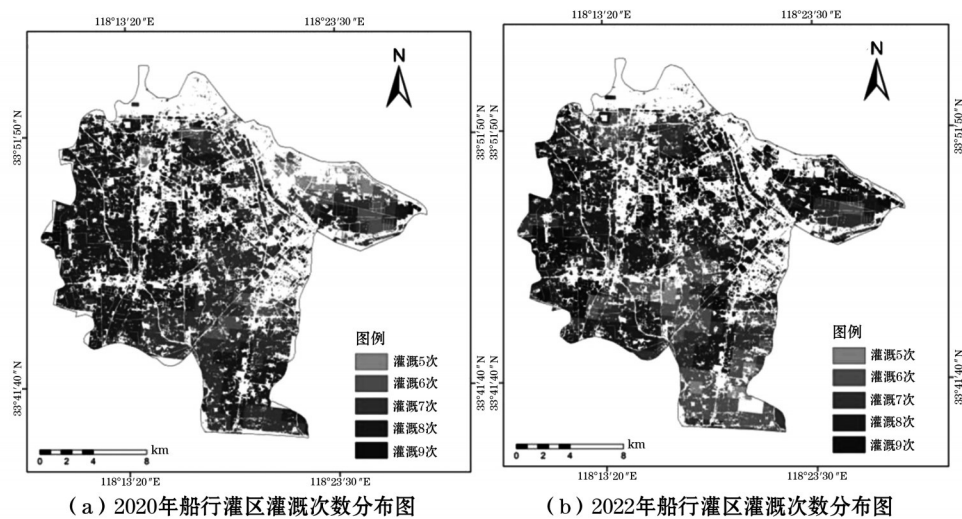


图5 船行灌区灌溉次数分布

监测结果进行精度验证,实际灌溉面积提取总体精度为89.69%。

#### 4.2 皂河灌区

基于GF-1、Sentinel-2、MODIS卫星数据,通过灌区多尺度实际灌溉面积遥感监测关键技术获取了2019年和2022年江苏省宿迁市皂河灌区主要作物种植结构、灌溉次数时空分布图,如图6、图7和图8所示。遥感监测结果显示,皂河灌区主要种植水稻、小麦、玉米和果树,种植模式以小麦水稻轮作为主,符合实地调研结果。2019年和2022年实际灌溉面积分别为1.04万 $\text{hm}^2$ 和0.88万 $\text{hm}^2$ ,灌溉次数集

中在7~9次,灌溉亩次分别为13.10万 $\text{hm}^2$ 次和12.97万 $\text{hm}^2$ 次。利用2019年野外勘察和卫星影像遥感解译获取的451个样本点,通过混淆矩阵方法进行精度评估,实际灌溉面积提取总体精度为89.71%,有效区分了灌溉区与非灌溉区,提取的结果较为可靠。

### 5 结论与建议

考虑到技术发展现状、气候条件和灌区管理情况,江苏省内灌区在大范围实际灌溉信息动态精准获取方面面临一些难题,构建了一种灌区多尺度实

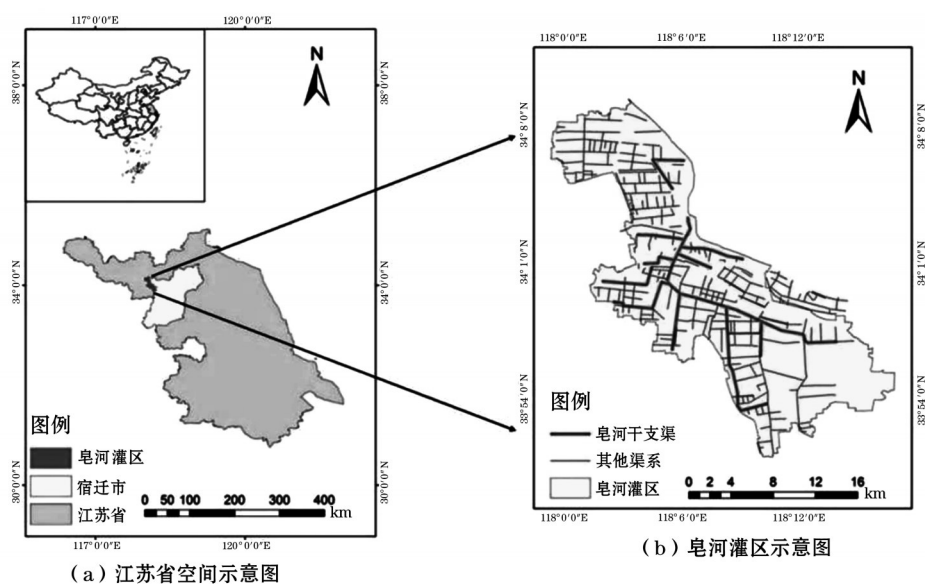


图6 皂河灌区地理位置

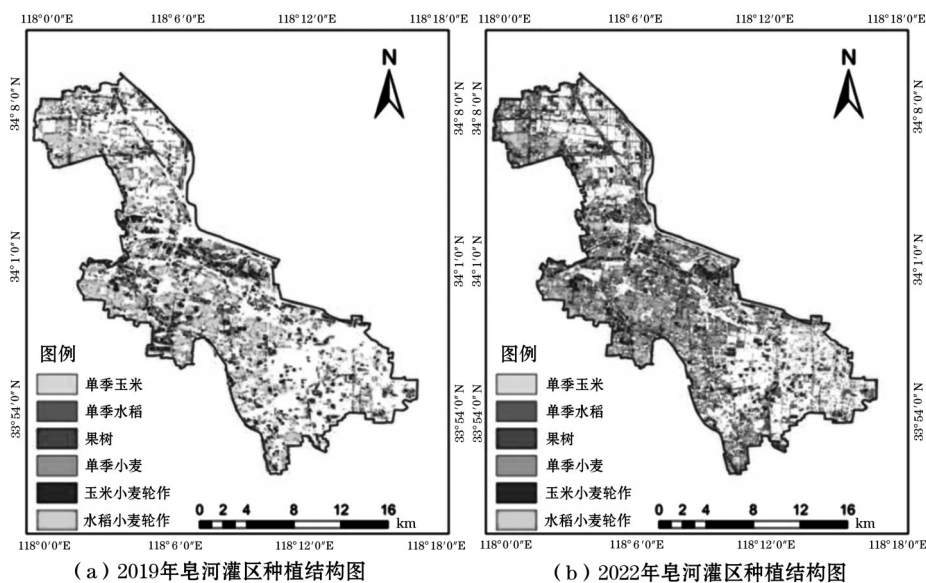


图7 皂河灌区种植结构分布

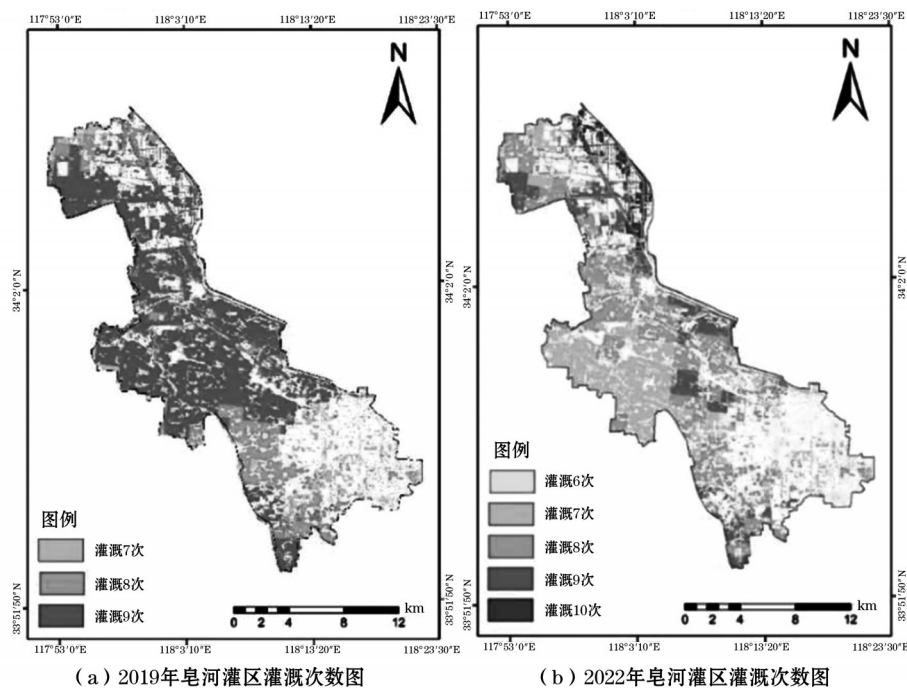


图8 皂河灌区灌溉次数分布

际灌溉面积遥感监测关键技术,利用该技术能够准确监测各类作物实际灌溉面积和灌溉次数的空间分布,获取灌溉亩次信息,结果精度较高,适用于以种植水稻为主的江苏省灌区。通过该方法准确监测获取灌区灌溉面积,能够帮助核算灌区每年的灌溉水利用系数,再结合作物种植结构和配水模型,可优化灌区配水方案,进一步提高灌溉水利用系数。在枯水年份,灌溉面积监测能够帮助评估作物旱情,为灌区抗旱减灾提供技术支撑。灌溉面积遥感监测技术具有显著优势,但尚未完全应用到灌区日常管理中,有待进一步在江苏省灌区大范围推广。

#### 参考文献:

- [1] 冯保清. 我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- [2] 张立福,彭明媛,孙雪剑,等. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992—2018)[J]. 遥感学报,2019,23(4): 603-619.
- [3] 何斌,武建军,吕爱锋. 农业干旱风险研究进展[J]. 地理科学进展,2010,29(5):557-564.
- [4] 宋文龙,李萌,路京选,等. 基于GF-1卫星数据监测灌区灌溉面积方法研究——以东雷二期抽黄灌区为例[J]. 水利学报,2019,50(7):854-863.
- [5] LU Y Z, SONG W L, LV J, et al. A pixel-based spectral matching method for mapping high resolution irrigated areas using EVI time series[J]. Remote Sensing Letters, 2021, 12(2): 165-174.
- [6] 郝震. 基于多源遥感数据的实际灌溉面积动态监测方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [7] LU Y Z, SONG W L, TIAN L J, et al. A new method to map spring irrigated areas using MODIS LST products and ancillary data in an agricultural district of Northwest China[J]. Water, 2022, 14: 2628.
- [8] Amina Abdelkadir Mohammedshum, BEN H. P. Maathuis, Chris M. Mannaerts, et al. Mapping small-scale irrigation areas using expert decision rules and the random forest classifier in Northern Ethiopia[J]. Remote Sensing, 2023, 15(24): 15245647.
- [9] QIAN X M, QI H W, SHANG S H, et al. Deep learning-based near-real-time monitoring of autumn irrigation extent at sub-pixel scale in a large irrigation district[J]. Agricultural Water Management, 2023, 284: 108335.
- [10] 王琼华. 多分辨率遥感图像复合分类方法研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [11] LU Y Z, SONG W L, SU Z C, et al. Mapping Irrigated areas using random forest based on GF-1 Multi-spectral data[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, XLIII-B2: 697-702.
- [12] LU Y Z, SONG W L, PANG Z G. Research on cosmic-ray neutron method for irrigation monitoring [C]// (Hubei Zhongke Geology and Environment Technology Institute). Proceedings of the 7th Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019: 7.