

乡村负碳发展目标下农田精准施肥灌溉系统构建规划研究

王佳¹ 刘丹一² 杨文斌² 胡依琳³ 王玉茜¹

1 郑州智拓生物科技有限公司

2 中国治沙暨沙学会

3 郑州永丰生物肥业有限公司

DOI:10.32629/as.v9i8.4236

[摘要] 乡村负碳发展是实现碳达峰碳中和目标的重要路径,而农田精准施肥灌溉系统的科学构建则是推动农业绿色低碳转型的关键工程。本文以豫西丘陵地区懈寺村千亩荒山综合体为研究对象,系统阐释乡村负碳农业核心内涵与政策导向,深入剖析传统农田水肥模式高耗高排短板及转型制约因素,揭示精准水肥一体化实现农田固碳减排的内在作用机制,最后搭建智慧水肥碳汇联动管控体系,并实施全维度碳效益量化评估,以期同类地区乡村负碳田园综合体建设提供系统性技术参考与规划范式。

[关键词] 乡村负碳发展; 精准水肥一体化; 碳汇核算; 智慧管控

中图分类号: S181 **文献标识码:** A

Research on the Construction Planning of Precision Fertilization and Irrigation Systems for Agricultural Land under Rural Carbon Reduction Development Goals

Jia Wang¹ Danyi Liu² Wenbin Yang² Yilin Hu³ Yuqian Wang¹

1 Zhengzhou Zhituo Biotechnology Co., Ltd.

2 Chinese Society for Desertification Control and Sand Management

3 Zhengzhou Yongfeng Bio-Fertilizer Industry Co., Ltd.

[Abstract] Rural negative carbon development represents a crucial pathway to achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals, while the scientific establishment of precision fertilization and irrigation systems for farmland serves as a key initiative driving the green and low-carbon transformation of agriculture. This study focuses on the 1,000-mu (approximately 667 hectares) barren mountain complex in Xiesi Village, western Henan Province, systematically elucidating the core concepts and policy frameworks of rural negative carbon agriculture. It thoroughly examines the high resource consumption and significant emission drawbacks of traditional agricultural water-fertilizer management practices, identifies the underlying mechanisms by which integrated precision water-fertilization systems facilitate carbon sequestration and emission reduction, and ultimately develops a smart integrated management system linking water, fertilizer use, and carbon sinks. Comprehensive quantitative assessments of carbon benefits are conducted to provide systematic technical references and planning paradigms for the development of similar rural negative carbon agro-industrial complexes.

[Key words] Rural carbon-negative development; Precision integrated water and fertilizer management; Carbon sink accounting; Smart management and control

引言

面对全球气候变暖趋势及我国碳达峰碳中和行动需求,农业是重要的温室气体排放部门也是未来可能成为重要碳汇的增长点,推动农业绿色低碳发展是落实碳中和的重要举措。因此,乡村负碳发展的理念应运而生,并对推动农业减污降碳协同提供了思路引导,另一方面,水肥一体化是农业生产中的重要部分,

加强其信息化、智慧化建设对于降低农业生产活动产生的碳排放以及增强农田固碳潜力具有重要意义。豫西丘陵区地势起伏较大、水源短缺、粗放式传统农业生产严重,发展智能测土配方施肥灌溉技术可有效推动农业生产可持续发展。本文结合懈寺村千亩荒山综合体的实际状况,对基于乡村负碳发展目标下的农田精准施肥灌溉系统进行研究设计,以期能够为丘陵地区的

乡村负碳田园综合体建设提供切实可行的系统设计方案及技术方案。

1 乡村负碳发展导向下精准水肥系统建设的理论基础与现实需求

1.1 乡村负碳农业核心内涵、政策导向与落地实施路径解析

乡村负碳农业是在乡村地区以农业生产方式变革、能源结构转型及生态治理为手段,在农业领域内实现碳吸收多于温室气体排放的农业活动模式。简言之,就是把增加碳汇、减少碳排放当作乡村农业发展的重要任务之一,并从农地固碳增汇、用能清洁化、废弃物循环利用等方面入手,构建气候友好型农业生产体系。一是顶层设计上,国家“双碳”目标提出要发展绿色农业,农业农村部印发《农业农村减排固碳实施方案》为农村负碳农业发展指明了方向;二是实施层面上,主要包括农地土壤固碳增汇行动方案、化肥农药使用量零增长行动方案、“三品一标”行动方案、绿色能源替代行动方案四个方面。而精准水肥一体化系统就是贯穿以上各个工程的技术核心。农田土壤碳汇提升工程是通过保护性耕作、有机肥施用以及精准水肥管理来增加土壤有机碳储量,提升农田碳汇能力。农业投入品减量替代工程则是通过精准施肥、生物农药替代等方式来减少化肥农药生产使用过程中的温室气体排放^[1]。农业废弃物资源化利用工程通过秸秆还田、畜禽粪污资源化利用,实现碳养分循环利用。可再生能源替代工程通过光伏提水、生物质能源利用,减少化石能源消耗。

1.2 豫西丘陵传统农田水肥模式高耗高排短板与转型制约因素

豫西丘陵区传统农田水肥管理模式以大水漫灌及粗放施肥为主,具有高耗高排的问题。在灌溉方面,采用大水漫灌方式使得用水效率低,并伴随着水分蒸发和深层渗漏造成的水资源浪费以及土壤含水量过高产生的甲烷等温室气体排放;在施肥方面,由于化肥使用过多,不仅增加了氧化亚氮的排放,同时带来土壤酸化及水体富营养化的危害;转型障碍包括因地形破碎造成设施改造难度大、农户低碳理念缺乏和技术适应性差、小农经营无法实现规模效益、丘陵地带水文条件不稳定易引发系统故障等问题,在以上障碍共同作用下,传统水肥方式向精确化低碳化方向转变存在诸多困难,这些问题都需要进一步进行统筹考虑及科技创新来解决。其中主要问题是地势起伏不平,河南省西部多山、沟壑纵横、坡陡谷深,大水漫灌无法满足地形要求,滴灌带、微喷灌头的安装布置需要更多的测量计算以及施工投入,一次性投入比平坦地带高得多。观念方面主要是农户低碳意识淡薄,长期以来农户习惯于粗放式的水肥管理模式,对于精准水肥技术所具有的节本增效和固碳减排效应缺少直接感知,接受新事物的主观愿望不强烈。分散经营模式是制度层面的制约,丘陵地区耕地细碎化程度高,户均经营规模小,难以形成统一的水肥管理标准和规模化的设备投入。

1.3 精准水肥一体化实现农田固碳减排的内在作用机制阐释

精准水肥一体化设备可以通过水肥协同供应及供需精准调控,在多途径实现农田固碳减排。在固碳途径方面,精准灌溉可保持土壤适宜墒情,改善土壤微生物群落结构,并增加作物根系生长以及根系分泌物投入,提高土壤有机碳累积量;精准施肥则可以根据作物需肥规律提供营养物质,防止因肥料施用过多造成土壤酸化及有机质快速分解,破坏土壤碳库稳定,在减源方面,通过对水肥进行精确调控降低 CH_4 和 N_2O 的产生,并提高植物固碳能力;在增汇方面,可通过合理灌溉和施肥促进植株生长,增加叶片光合速率,从而增加生物量固碳。此外,还可从减少灌溉能耗以及化肥制造、运输等环节间接碳排放入手,产生源尾全链减碳效果。从土壤固碳角度分析,精准灌溉把土壤水分维持在适合作物生长的状态下,不会因过量灌水造成土壤缺氧状态,减少甲烷菌活跃度而降低甲烷释放量。同时适宜的土壤水分也利于好氧微生物的活动,有助于秸秆、根系分泌物等有机物料的分解转化,形成稳定的土壤有机质。精准施肥是根据测土配方和作物营养诊断,将氮磷钾等养分精确地供应到作物根系附近,避免了传统的撒施造成养分淋失和挥发损失,降低了 N_2O 排放。从作物固碳角度分析,水肥耦合调控改善了作物光合生产和营养吸收过程,增加地上部生物产量,提高了作物固定 CO_2 的量。

2 负碳目标引领下全域精准施肥灌溉系统总体规划体系构建

2.1 懈寺村千亩荒山综合体地形、作物、水资源基础条件研判

懈寺村千亩荒山综合体地处豫西丘陵中心地带,总体地势为西部高东部低、北部陡南部缓的梯形分布区,海拔高程介于180~420m,坡度主要分布在 $15^\circ \sim 25^\circ$,部分陡坡大于 30° ,地形碎片化严重,沟谷切深密布,对灌溉管网布置及水源工程设置造成一定困难^[2]。园区拟建作物有樱桃经济林、辣椒等露地蔬菜及侧柏、刺槐等碳汇林,由于各农作物需肥用水需求有较大差异,并且作物生育期也有较大的重叠,所以水肥设施需要满足区分时供肥供水的要求;从水资源角度来说,区域内多年平均降雨量为650mm左右,年内和年际变化大,其中夏季雨水集中超过全年的60%,春季干旱多发,地表径流失较为严重,地下水源深度较深,取用难度较大。园区内共有小塘坝3处,蓄水能力约8万 m^3 ,淤塞较为严重,未实现有效连接,无法提供稳定的、可控的灌溉用水源。

结合项目专项规划,园区1000亩土地按照地形坡度、产业功能划分为四大功能片区,各片区面积、地形与种植类型明细如下表所示。

根据以上基本情况分析,水肥系统的方案设计应遵循以下原则:因地制宜原则、因物制宜原则以及水源保障原则。就作物差异而言,樱桃属于多年生深根性果树,需水量大而耐旱性强,辣椒是浅根性一年生蔬菜,需水次数多而每次灌水量少,碳汇林则是生态林树种,需水量较小但需确保造林成活。从水源可靠性来看,应形成以蓄水池调蓄为主、光伏提水补充为辅、雨水集蓄备用的多水源可靠保障,保证枯水年份及枯季正常供水。

表1 懈寺村1000亩园区功能分区明细

功能分区	面积(亩)	细分说明	地形条件
樱桃种植基地	320	幼龄园120亩(1-3年生)、盛果园200亩(4年以上)；株行距4m×2.5m,亩栽67株	向阳缓坡梯田,坡度5°-15°
辣椒种植基地	200	鲜食线椒120亩、朝天椒80亩；起垄栽培,垄距0.8m,亩定植4200株	平缓梯田,坡度≤5°
生态碳汇林	380	针阔混交碳汇林,造林密度110株/亩；鱼鳞坑整地。	陡坡、沟壑、山顶,坡度15°-25°
综合配套区	100	含服务中心、肥料发酵车间、配肥站、仓储、入口湿地、机耕道	入口平缓地块
合计	1000	——	——

表2 园区各分区灌溉形式、末端设备与年度补充灌溉定额参数

分区	灌溉形式	末端配置	年补充灌溉定额	灌溉频次(年)	单次灌水量
樱桃盛果园	压力补偿式滴灌	每行1条滴灌管,单株4个滴头,流量4L/h	140m³/亩	8-10次	15-18m³/亩
樱桃幼龄园	压力补偿式滴灌	每行1条滴灌管,单株2个滴头,流量4L/h	120m³/亩	7-8次	15m³/亩
辣椒种植区	薄壁滴灌带+全膜覆盖	每垄1条滴灌带,滴孔间距30cm,流量2L/h	190m³/亩	12-14次	12-15m³/亩
碳汇林区	鱼鳞坑集雨+旱季补灌	幼林期配套简易渗灌管,成林后以自然降水为主	20m³/亩(仅幼林前3年)	2-3次/年(旱季)	8-10m³/亩
综合配套区	喷灌+再生水回用	绿化区喷头浇灌	80m³/亩	6-8次	10-12m³/亩

表3 园区年度碳移除类分项固碳核算表

细分项	面积/规模	核算方法	年碳汇量(tCO ₂ e)
1.碳汇林木固碳	380亩	380亩×1.2tCO ₂ e/亩·年	456
2.樱桃经济林固碳	320亩	320亩×0.3tCO ₂ e/亩·年	96
3.辣椒生物量固碳	200亩	按干物质产量核算:鲜椒亩产2000kg,地上部分干物质率12%(264kg/亩),地下根系干物质40kg/亩,合计干物质304kg/亩×含碳率45%×CO ₂ 系数3.667×200亩÷1000	100
4.生物炭土壤固碳	520亩种植区	基肥:樱桃320亩×0.8t/亩+辣椒200亩×0.5t/亩=356t;采后恢复肥:樱桃320亩×0.2t/亩=64t;合计年追加生物炭420t×含碳率75%×固存率90%×CO ₂ 系数3.667	1,039
5.农艺措施土壤固碳	520亩种植区	520亩×0.025%×土壤容重1.30g/cm³×耕层30cm×3.667	186
碳移除类合计	—	—	1,857

2.2碳汇优先导向下水肥系统四大规划设计原则落地逻辑

综合考虑园区基础条件分析及负碳发展需求,水肥系统规划应坚持以下四个基本原则:一是碳汇优先的原则,在进行系统设计过程中,所有设计和技术参数的选择以及运行管理方式都以实现农田最大碳汇量增加和温室气体排放最少为目标,并将碳效益作为首要评价依据。换句话说,在灌溉定额方面,不仅要考虑作物的需水情况,同时也要考虑在不同灌水量下土壤CH₄的排放及有机碳储量;在施肥方式方面,不仅要考虑作物产量,还要考虑首先要采用低N₂O气体释放势的肥料品种及施用方法。二是水土适配原则,充分考虑山地地形因素及空间异质性土壤的因素,灌溉制度和管道布置应能适应不同地形坡度、土壤类型、土壤深度等因素,以防止侵蚀和破坏。也就是说,在坡度

较高的地方使用微型喷头而不是滴头,从而降低表面径流量的风险,而在土壤深度较低的地方限制每次的灌溉量,以防渗透过深,在较轻土壤中则增加灌溉次数。三是延后浇灌,在粘土地上延长浇灌时间。四是分区分类精准原则,根据不同的作物种类和不同的地形区段,采取不同的水肥供用定额和灌溉制度,做到一区一制一作物一定。也就是说山顶碳汇林区与山腰樱桃区、山麓辣椒区必须采用完全不同的灌溉制度和肥料配方,同品种不同坡面及海拔也需要对参数进行微调。四是智能控制原则,基于物联网、大数据及人工智能技术,建立水肥供给与碳汇观测的联动控制体系,达到无人值守、智能决策的目的。也就是说监测网不仅要收集土壤信息和气象数据,还要收集土壤温室气体排放以及碳库的信息,管理平台不仅要进行

水肥供给的优化,另外还需对碳汇收益进行及时计算及运行方案优化。

2.3 园区多功能分区产业布局与差异化水肥配套布局设计

依据地形条件、土壤特性和功能定位,园区划分为四个核心功能区^[3]。山顶生态防护区海拔380米以上,以侧柏、刺槐等碳汇林为主,承担水土保持和碳汇增量的生态功能,配套设计以雨水集蓄和微喷灌为主的轻简水肥系统,灌溉定额较低,重点保障造林成活率和林木生长势。山腰经济林果区海拔280米至380米,以樱桃等落叶果树为主,是园区经济产出的核心区域,配套设计滴灌与微喷灌相结合的精准灌溉系统,并配置果树专用肥精准施用装置,水肥供应需匹配果树萌芽、开花、果实膨大等关键生育期。山麓蔬菜种植区海拔180米至280米,以辣椒等露地蔬菜为主,轮作周期短、水肥需求密集,配套设计水肥一体化滴灌系统,实现高频率、低定额、精准化的水肥供应。涵养区位于沟谷低洼处,包括生态湿地及缓冲带,具有调蓄径流和净化水质的功能,在此区域不直接设置灌溉设施,但属于水源调蓄范围,4个分区水肥配套建设相对独立,同时依托水源工程建设以及管路输配成为统一的整体。山顶生态防护区的水肥系统建设主要考虑生态效益最大化,采用轻简低成本配置,灌溉设施以可移动式微喷为主,施肥以秋季基施有机肥和春季追施缓释肥为主,减少人工管理投入。山腰经济林果区的水肥系统配置最为完善,采用固定式滴灌与微喷灌双系统,滴灌管沿等高线布设于树冠投影区,微喷用于花期防霜和夏季降温,施肥系统配有专用果树肥注入装置,实现N-P-K和微量元素的精确配比。山麓蔬菜种植区水肥系统注重高频次和精细化,采用贴片式滴灌带铺设于作物行间,施肥系统配有高浓度水溶肥自动配比装置,实现每次灌溉都可以进行施肥。

3 丘陵荒山适配型精准灌溉与分作物标准化施肥专项工程规划

3.1 分区灌溉模式、末端设备选型与作物年度补充灌溉定额设计

根据各分区的地形条件及作物种类的不同,分区制定灌溉方式及灌水器形式^[4]。山顶碳汇林区以小管出流+树盘微喷为主,小管出流量4L/h,工作压力100kPa,树盘铺设覆草,降低水分蒸发损失,年补给灌溉水量按 $80\text{m}^3/(\text{a}\cdot\text{亩})$ 设计,主要用于每年春季造林后至成活期间以及夏季缺水时期的补水。山腰樱桃区采取压力补偿式滴灌管,滴头流量2L/h,滴头间距0.5m,沿等高线布设,全年补灌定额为 $120\text{m}^3/\text{亩}$,分布在萌芽水、花后水、硬核水、采后水4个时期,山麓辣椒区采取贴片式滴灌带,滴头流量1.5L/h,全年补灌定额为 $150\text{m}^3/\text{亩}$,根据不同生育期的需求进行分时段控制管理,即苗期、花期、果期分别控制,根据丘陵地区地形坡降对管道终端的压力影响,终端阀组选用压力补偿阀门,以保障各高程段流量分配达到90%以上,结合灌区内农作物用水量及当地降雨量,选取多年平均降雨量的75%,作为设计灌水标准,并根据节水灌溉系数进行修正,形成分区灌溉参数对照表。

具体而言,碳汇林区的灌溉模式选择充分考虑了造林初期的成活保障需求和成林后的低维护要求,小管出流灌溉通过小口径管道将水直接输送到树根附近,流量小、压力低,适合分散种植的树木,配合树盘微喷可以在高温季节为树冠降温并增加空气湿度。根据樱桃树根系分布情况及生育期需水特性确定选用压力补偿式滴灌管,滴头流量2L/h可满足樱桃中等量用水需求,并能保证丘陵坡度上、下不同位置出水均匀性,防止因管道水压差异造成滴灌水量分配不均。

3.2 蓄水池、光伏提水、分级管网一体化水源输配工程规划

水源输配工程构建蓄水池、光伏提水和分级管网一体化系统。蓄水池工程在园区最高点海拔410米处新建2000立方米高位蓄水池1座,作为整个系统的调蓄中枢和重力供水水源,在海拔300米和220米处分别建设500立方米和300立方米调蓄池各1座,形成三级调蓄体系。高位蓄水池选址根据地形勘测及重力供水可行性分析,在海拔410m处为园区最高点可以向各功能区重力供水,2000 m^3 的容积是依据园区一次最大的灌溉用水量及水源来水周期综合确定。光伏提水部分在园区周边可利用坡地上布置150kW光伏阵列,配套水泵机组,把沟谷水源及雨季径流提送至各级蓄水池,实现灌溉用能清洁替代。150kW光伏阵列为提水用电量设计,按每天提水8h,水泵效率为80%,可满足平均每天提水量在600 m^3 左右的要求。管网采取逐级输配,主管采用 $\Phi 160$ 聚乙烯管,主要沿园区主干道及山脊线设置,起到输水作用;干管采用 $\Phi 110\text{mm}$ 管沿等高线向两边延伸布置,支管采用 $\Phi 63\text{mm}$ 沿等高线垂直下坡方向布置,毛管采用 $\Phi 20\text{mm}$ 滴灌管直接连至作物上。管线敷设利用地形坡降,在陡坡处加装减压阀和排气阀,并保证管底埋深不小于60cm防止冻坏和人为破坏,在重要位置设有阀门及水表,便于调节控制供水范围。减压阀按压力公式进行计算并选取,以满足下游管道内压力不大于该管道的设计工作压力为原则,排气阀则安装于管道顶部。避免发生气阻而造成水流不畅。管网进行水力计算选用哈森威廉公式对各管段进行流速及压损校核,并保证最不利点处出水压力满足末端设备的要求^[5]。整个水源输配工程实现了蓄水池调蓄、光伏提水清洁供能、分级管网精准输配的有机统一,为园区精准灌溉提供了可靠的水源保障和高效的输配能力。

3.3 樱桃、辣椒、碳汇林全生育期分阶段精细化灌溉制度安排

樱桃全生育期灌溉制度划分5个阶段。休眠期:11月至翌年2月份,土壤墒情达到田间持水量的60%左右,一般不进行灌溉,遇极端干旱可补灌1次封冻水,封冻水灌溉定额为 $15\text{m}^3/\text{亩}$,于夜冻昼消时进行,有利于储水及保护根系;萌芽期:3月上中旬,灌水量为 $20\text{m}^3/\text{亩}$,促使花芽萌动、新梢生长,此期水应提前三周在萌芽前进行,以保证土壤化冻后根能吸收到水分;开花坐果期在4月,灌水量每亩15立方米,采用少量多次方式,避免大水导致落花落果,灌溉时间应避开盛花期,选择花前和花后各灌一次。果实膨大期从5月至6月,是全年需水高峰期,灌水量每亩50立方米,分三次实施,保持土壤湿润均匀,此期缺水会直接导致果实个

小、品质差。采后期在7月至8月,灌水量每亩25立方米,配合追肥促进花芽分化,为翌年丰产奠定基础,此期灌溉不宜过晚,以免影响枝条成熟和越冬抗寒能力^[6]。辣椒全生育期划分为苗期、花期和果期三个阶段,苗期灌水量每亩20立方米,控水促根防徒长,苗期适度干旱有利于根系下扎和侧根发育。花期灌水量每亩30立方米,保证开花坐果所需水分,此期土壤水分应保持在田间持水量的70%左右。果期灌水量每亩80立方米,分四次实施,盛果期保持较高土壤含水率,但应避免田间积水导致疫病发生。碳汇林灌溉重点在造林后前三年,第一年灌水量每亩40立方米,分四次实施确保成活,分别在造林后、初夏、盛夏和秋季各灌一次。第二年和第三年每年灌水量每亩30立方米,三年后林木根系深入地下,逐步减少灌溉依赖,转向自然降水为主。

4 智慧水肥碳汇联动管控体系搭建与全维度碳效益量化评估

4.1 水肥智能管控平台架构与自动配肥灌溉无人化作业机制

智慧管控平台采用云-边-端三级架构。云端负责数据存储、模型运算以及远程管理,实现大数据分析和决策优化等功能,在云端服务器上配置高性能计算机,运行作物生长模型、水肥优化模型及碳汇评估模型;边缘端在现场布置边缘计算网关,实现对现场数据进行本地化分析并实时做出控制反馈,在网络中断的情况下也能保证系统的独立运作能力,边缘网关配备工控机及本地数据库,缓存重要信息和控制策略;终端层包括田间传感设备、闸门和施肥机等,负责数据感知和控制操作,其中传感设备为低功耗设备,电池供电不少于2年,阀门为电动阀门,反应速度 $\leq 3s$ 。施肥机为母液稀释式注入型,设A、B、C母液池存放大量元素N、P+K和中微量元素母液,根据作物需求量及滴灌水头用量动态调配母液池的注肥比例,并由文丘里压力补偿式注肥泵和磁力流量计控制。精确施肥误差 $\leq \pm 5\%$ 。母液罐容量根据每次最大施肥量及母液浓度设计,其中A池 $2m^3$ 储存氮母液,B池 $1.5m^3$ 存储磷钾母液,C池 $0.5m^3$ 储存微量元素母液;无人化作业机制是依据作物生长模型和土壤墒情预测,生成灌溉施肥处方,并在管理人员远程确认后自动完成,或者根据预先设定的临界条件自动启动,在紧急状态下完成决策、执行全过程无人干预操作。作物生长模型以积温理论和作物发育阶段理论为基础,结合作物品种特性和当地气象数据,预测作物生育进程和需水需肥规律。

4.2 田间墒情肥力气象监测网络布设与实时数据采集传输体系

监测网络按照每50亩一个监测点的密度布设,全园区共布设20个固定监测点和5个移动监测点。每个固定监测点配置土壤水分温度传感器,埋设深度分别为10厘米、20厘米、40厘米和60厘米,实时监测不同土层墒情变化,传感器采用频域反射技术,测量精度正负3%。配置土壤氮磷钾速测探头和土壤酸碱度传感器,监测土壤肥力状况,氮磷钾探头采用离子选择电极技术,酸碱度传感器采用玻璃电极技术^[7]。布设小气候观测站,监测空气

温湿度、风速风向、太阳辐射和降雨量,小气候观测站配置百叶箱、风向风速仪、总辐射表和翻斗式雨量计,巡检监测站点配置手持叶绿素仪和作物生长状况摄像头,定期进行作物养分诊断和生长评价,手持叶绿素仪利用光学透过法对叶片叶绿素浓度非破坏性测定,作物长势相机定时拍摄固定视角的作物图像,并进行作物覆盖度及生长状态的分析判断,传输方式为LoRa无线通信+4G网络混合式,田间的监测信息经过LoRa的网关汇总到边缘计算节点上,然后利用4G上传到云端,LoRa使用470兆赫兹频率。传输距离达到3~5km,满足园区范围;传输间隔设置成15min/次,在紧急状态下可以提高到1min/次,紧急状态包括土壤含水率低于凋萎系数、气象站检测到有暴雨预警以及传感器数据发生跳变等。

4.3 数字化碳汇台账、农产品碳足迹溯源与CCER核证支撑模块

碳汇管理子系统建立电子化的碳汇账本,分别按地块和作物类型记载土壤有机碳变化量、植被生物量碳增量、投入品碳排放量和能源消耗碳排放量,构成碳收支账户体系。土壤有机碳变化量根据定点监测的土壤有机碳密度的变化乘以面积计算,固定监测点每年取样化验土壤有机碳含量,并计算其变化率。根据林木生长模型以及经果林产品产量估算植被生物量碳增量,其中樱桃以年均生物量增加和产量进行核算,碳汇林则以蓄积量增量乘以生物量扩大系数。农产品碳足迹溯源部分包括了农作物生产过程中所使用的投入品及能源的全过程信息。核算单位产品碳足迹,生成可追溯的碳标签。碳足迹核算包含种子、化肥、农药、灌溉电能、机械作业燃油等直接投入及肥料生产、农药生产、发电生产等上游间接排放^[8]。CCER核证支撑模块依据国家核证自愿减排量方法学要求,整理项目设计文件、监测报告和核证所需的全部数据和证明材料,包括项目边界、基准线情景、额外性论证、减排量计算和监测计划等内容,为项目进入全国碳市场提供技术支撑。项目边界明确为懈寺村千亩荒山综合体范围内的全部农业生产活动,基准线情景为传统大水漫灌和粗放施肥模式下的碳排放水平,额外性论证通过投资分析和障碍分析证明项目在没有碳收益情况下不具备经济可行性。

为直观体现系统全维度碳效益,依托专项规划统一核算系数与边界,对园区碳移除类固碳效益分项量化测算,测算结果如表3。

5 结语

农业绿色发展负碳化是未来乡村发展的必然趋势,而如何建设精准化水肥管理设施是其重要组成部分之一。文中基于豫西丘陵地区懈寺村千亩荒山综合体内,提出并设计了负碳化背景下精准水肥管理体系的总体布局及具体实施方案,并从规划原理、总图布置、详细设计以及智能化监控等方面进行了阐述。研究表明,通过碳汇优先导向下的系统规划和智慧水肥碳汇联动管控,能够有效提升农田碳汇能力、削减农业温室气体排放,为同类地区乡村负碳田园综合体建设提供了可复制、可推广的技术范式。

[参考文献]

[1]夏旭,李银坤,陈敏鹏,等.碳氮水添加对华北小麦-玉米双季轮作系统碳平衡的影响[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(2):250-260.

[2]孙鸿,王婧,安帅霖,等.浅谈智能灌溉施肥系统设计及应用[J].农业开发与装备,2020(11):113-114.

[3]韩卫华.智能水肥一体化关键技术的研究[J].农产品加工,2020(11):108-110,112.

[4]任玉洁,郭洪恩.智能灌溉系统的研究进展[J].浙江农业科学,2020,61(9):1932-1935.

[5]金洲,张俊卿,郭红艳,等.水肥浓度智能感知与精准配比

系统研制与试验[J].智慧农业(中英文),2020,2(2):82-93.

[6]郝洁,高阳,王绪奎,等.从耕地质量保护角度看“双碳”目标实现[J].中国农技推广,2022,38(8):56-58.

[7]周晓玲.施加玄武岩粉末的固碳潜力及其对红壤理化性质和小麦生长的影响[D].武汉:华中农业大学,2022.

[8]孙宝昌,密梦桐,王升一,等.工业CO₂大规模农业资源化利用负碳新途径——CO₂水液肥新路径实现农作物增产及盐碱土壤改良固碳[J].Engineering,2025,48:12-15.

作者简介:

王佳(2000--),女,汉族,四川南充人,专科,研究方向企业管理。