

西南水稻主产区用水现状与绿色高效灌排技术

崔宁博¹, 尹飞虎², 龚道枝^{3*}, 贺秀斌⁴, 陈飞¹, 赵璐¹, 郑顺生¹, 张艺璇¹, 吴宗俊¹

(1. 四川大学水利水电学院 / 山区河流保护与治理全国重点实验室, 成都 610065; 2. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆石河子 832000; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 / 作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室, 北京 100081; 4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 西南水稻主产区面临季节性干旱、工程性缺水等生产问题, 绿色高效灌排技术是该区域实现节水稳产增效的关键举措, 对保障国家粮食安全具有重要意义。本文系统梳理了包括云南省、贵州省、四川省、重庆市在内的西南地区水稻生产用水现状和灌排技术现状, 阐述了西南水稻主产区绿色高效灌排体系的基本特征、绿色高效灌排的具体技术类型, 提出了由稻田精准需水预报、灌区精量配水管理、田间高効用水管理、田间高効排水管理构成的绿色高效灌排技术模式。研究发现, 西南水稻主产区水资源丰富但时空分布不均, 节水灌溉和排水技术落后且对各地区气候条件、水资源量、地形的适用性有较大差异。建议研发稻田灌排高効协同调控新技术、推广绿色高效灌排技术体系、优化稻田水肥运筹模式、开发稻田智能灌排与信息化管理系统、构建水稻绿色高效灌排技术多维推广体系, 据此推动西南水稻主产区节水提质增效与绿色减污降排多赢。

关键词: 水稻; 灌排技术; 西南地区; 绿色高効; 节水

中图分类号: S274 **文献标识码:** A

Water Utilization Status and Suggestions for the Development of Green and Efficient Irrigation and Drainage Technology in the Main Rice-Producing Areas of Southwest China

Cui Ningbo¹, Yin Feihu², Gong Daozhi^{3*}, He Xiubin⁴, Chen Fei¹, Zhao Lu¹, Zheng Shunsheng¹, Zhang Yixuan¹, Wu Zongjun¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University/State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China; 2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Engineering Laboratory for Efficient Water Use and Disaster Loss Reduction of Crops, Beijing 100081, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The main rice-producing areas in Southwest China are facing production problems such as seasonal drought and engineering

收稿日期: 2023-12-16; **修回日期:** 2024-04-01

通讯作者: *龚道枝, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员, 研究方向为农业水资源与环境; E-mail: gongdaozi@caas.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“四川季节性干旱区农业绿色高効用水机制与抗旱减灾战略研究”(2023-DFZD-31); 国家自然科学基金项目(52309056); 四川省科技计划项目(2023YFQ0034)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

water shortage. A green and efficient irrigation and drainage technology system is key to achieving water conservation, stable yield, and high efficiency in the region, and it is of great significance to the food security of China. This study reviews the current status of water use, irrigation, and drainage in the main rice-producing areas in Southwest China, involving Yunnan, Guizhou, Sichuan, and Chongqing. It examines the basic characteristics and specific technical types of green and efficient irrigation and drainage systems in the areas, and proposes a green and efficient irrigation and drainage technology model that is composed of accurate water demand forecast of paddy fields, precision water distribution management in irrigation areas, efficient water use management in paddy fields, and efficient drainage management in paddy fields. The study found that the main rice-producing areas in Southwest China are rich in water resources but uneven in spatial and temporal distribution of water. The water-saving irrigation and drainage technologies in this region are backward and vary in the applicability of climate conditions, water resources, and topography. Therefore, we propose the following suggestions: (1) developing new technologies for the efficient and coordinated regulation of irrigation and drainage in paddy fields, (2) promoting the green and efficient irrigation and drainage technology system, (3) optimizing the water and fertilizer operation mode, (4) developing an intelligent irrigation system for paddy fields, (5) establishing a paddy field information management system, and (6) building a multi-dimensional technology promotion system, thus to achieve water conservation, pollution control, emission reduction, yield increase, and quality improvement in the main rice-producing areas of Southwest China.

Keywords: rice; irrigation and drainage technology; Southwest China; green and efficient; water saving

一、前言

水稻是主要的粮食作物之一，全球约有 45%~50% 的人口以稻米为食。在我国，水稻作为第二大粮食作物，种植面积约为 $3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，年产量约为 $2 \times 10^8 \text{ t}$ ，约占粮食总产量的 30%，在保障粮食安全方面占据重要地位^[1]。包括云南省、贵州省、四川省、重庆市在内的西南地区是我国水稻四大主产区之一，水资源丰富，气候温暖湿润，水稻种植历史悠久（以种植杂交籼稻为主），涵盖平原、丘陵、山地等种植区域类型^[2]。

西南地区春季多低温寒潮，不仅影响水稻的前期生长发育，还易诱发病害^[3]；季节性干旱频发，工程性缺水严重，灌溉水利用系数仅在 0.5 左右，与世界先进水平（0.73 以上）差距明显^[2]。长期的粗放施肥管理使西南地区水稻生产消耗了大量氮肥（为全球农田平均施氮量的 4.12 倍），氮肥利用效率仅约 33%（为世界平均水平的 60%~70%）^[4,5]；过量且低效的施肥方式不仅影响水稻生长，在不合理的灌排模式下还易引发农田生态环境污染。自 2015 年起，我国发布了一系列政策文件，推动化肥减量施用和灌排技术发展^[6]，提高农业绿色生产水平。“少施用、高利用”的科学灌（施）排方式，对保护农业生态环境、实现农业绿色高效可持续发展具有重要意义。

目前，西南水稻主产区降雨时空分布不均、灌排管理方式粗放，缺乏科学合理的灌排技术体系，导致水稻产量不稳、品质不高以及水分利用效率偏低，不利于保障国家粮食安全。为此，本文在梳理

云南省、贵州省、四川省、重庆市用水现状的基础上，总结区域内灌排现状，明晰绿色高效灌排体系要素，提出未来发展建议，为西南地区水稻产量、品质、水分利用效率协同提升，水资源优化配置与高效利用提供依据。

二、西南水稻主产区农业用水现状

西南地区水稻种植总面积约为 $3.89 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，农田灌溉水有效利用系数为 0.49~0.52，而全国平均值、发达国家标杆值分别为 0.58、0.73 以上，这表明西南地区节水减排潜力显著。灌溉用水定额、泡田定额是农业生产中的重要指标：前者指在规定水文年型下核定的水稻播种、栽秧前及全生育期（或全年）内单位面积上各次田间净灌溉用水量之和的限定值；后者指水稻栽秧前对稻田进行灌水浸泡，单位面积对应的净灌水量限定值。由于气象、土壤、水稻品质等的不同，西南地区各省份的水稻灌溉方式、灌溉用水定额与泡田定额也存在差异。

（一）云南省

云南省水资源总量约为 $2.21 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，居全国第 3 位^[7]，但水资源的时空分布不均。在全省大部分地区，汛期（7—9 月）降水约占全年降水量的 85%，而 11 月—次年 4 月是农业灌溉用水的集中期，降水仅占全年的 15%，极易出现冬旱、春旱以及多季连旱。2022 年，全省农业用水量为 $1.115 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，占全省总用水量的 68.3%，农田灌溉水有效利用系数为 0.502^[7]。

水稻是云南省的优势作物，种植历史悠久，全省共有125个县种植水稻。2022年，云南省水稻播种面积为 $7.095 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，稻谷产量为 $1.064 \times 10^7 \text{ t}$ ，单产为 6.5 t/hm^2 ^[8]。水稻主栽品种有晚籼稻、早籼稻、粳稻和糯稻等，主要灌溉方式为格田畦灌，部分地区也有采用浅灌深蓄方式。水稻生产经常面临严重的春旱，季节性缺水严重，补充灌溉是实现水稻高产优质的重要手段。当前，水稻主产区灌溉用水管理粗放、用水效率不高等问题较为突出，亟需推广节水灌溉技术、转变用水方式、优化用水结构，提高灌溉水的利用效率及效益。

根据用水定额、水稻播种和收获周期，将云南省水稻种植划分为一季中稻、双季早稻、双季晚稻、再生稻4类，分别确定其灌水定额。其中，一季中稻分为6个种植区，相应分区灌溉定额如表1所示，双季早稻、双季晚稻、再生稻的灌溉定额如表2所示。

(二) 贵州省

贵州省水资源总量约为 $1.062 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，居全国第9位，多年平均降水量为800~1700 mm^[9]。由于地形多山，境内水资源时空分布不均；旱灾是常见且危害严重的自然灾害，在冬、春季易出现季节性干旱，“插花性”夏旱每年都有发生，平均4年一大

旱。季节性干旱影响水稻的播种、幼苗生长、生长后期水分需求，进而影响产量和品质。贵州省内地形大多为山地和高原，区域性水资源短缺严重，因而补充灌溉是水稻实现高产优质的重要手段。2022年，全省农业用水量为 $6.315 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占全省总用水量的65.5%，农田灌溉水有效利用系数为0.52，低于全国平均水平（0.58）^[9]。

水稻是贵州省第一大粮食作物，种植面积、产量分别为 $6.452 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、 $4.174 \times 10^6 \text{ t}$ ，分别占全省粮食作物种植面积与产量的23%、55%，近90%的人口以大米为主食^[10]。贵州省的稻田绝大多数为梯田，水稻种植以往依赖传统的雨养农业，主要采用科灌、科蓄、普灌等灌溉方式，无田间渠系，灌溉设施较为滞后，保水性能差^[11]。2018年，贵州省有效灌溉面积为 $1.606 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，其中节水灌溉面积为 $3.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 、高效节水灌溉面积为 $1.955 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[9]。贵州省的 $6.452 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 稻田中， $5.835 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 有灌溉设施；降水和稻田排水导致稻田氮磷流失量常年处于较高水平，农业面源污染严重；稻谷化肥利用率为39.1%。综上，贵州省水稻用水存在效率偏低、用水浪费等问题，需要推广应用节水灌溉技术，提高灌溉水的利用效率及效益。

贵州省中稻种植划分为5个区域，相应的水稻灌溉定额如表3所示。

表1 云南省一季中稻灌溉用水定额

灌溉分区		基本用水定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)			泡田定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
		$P=50\%$	$P=75\%$	$P=90\%$	
滇中区 (I区)	I-1	2925~3150	3675~3900	4200~4575	2250~2400
	I-2	3825~3900	4275~4500	5100~5325	2400~2550
	I-3	4275~4350	4875~5025	5400~5625	2400~2550
	I-4	3750~3825	4350~4500	4800~5025	2250~2400
滇东南区 (II区)	II-1	3600~3675	4125~4275	4425~4650	2550~2700
	II-2	4425~4500	5025~5175	5550~5775	2400~2550
滇西南区 (III区)	III-1	2025~2100	2400~2550	3075~3225	2100~2250
	III-2	2700~2775	3150~3450	3600~3825	2400~2550
	III-3	450~3900	4275~4500	4950~5250	2250~2400
滇东北区 (IV区)	IV-1	30~2700	3375~3750	4050~4350	2250~2400
	IV-2	3450~3675	3975~4275	4500~4875	2400~2550
滇西北区 (V区)		2925~3150	3750~3900	4200~4425	2400~2550
干热河谷区 (VI区)	VI-1	6675~7050	7125~7575	7650~8175	2550~2700
	VI-2	6000~6375	6450~6900	6900~7425	2400~2550
	VI-3	5100~5475	5700~6150	6450~6975	2400~2550

注：P表示水文年型；P=50%、P=75%、P=90%分别对应于平水年、中等干旱年、特枯年；数据来自《2022年云南省水资源公报》。

表2 云南省双季早稻、双季晚稻和再生稻灌溉用水定额

种类	基本用水定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)			泡田定额/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
	P=50%	P=75%	P=90%	
双季早稻	4425~4800	5100~5550	5850~6300	2550~2700
双季晚稻	2925~3225	3225~3600	3825~4200	525~600
再生稻	750~825	825~900	975~1050	

注：数据来自《贵州省行业用水定额 第一部分：农业灌溉用水定额分册》。

表3 贵州省中稻基本灌溉用水定额

水文 年型	基本用水定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)				
	I区	II区	III区	IV区	V区
50%	3150~ 3600	3800~ 4350	3350~ 3850	2700~ 3100	3400~ 3950
80%	4000~ 4600	4350~ 5050	4300~ 4950	3450~ 4000	3800~ 4350
90%	4300~ 4950	4650~ 5350	4650~ 5350	4050~ 4650	4450~ 5100

注：数据来自《贵州省行业用水定额 第一部分：农业灌溉用水定额分册》。

(三) 四川省

四川省水资源总量约为 $3.49 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，全省灌溉面积为 $3.228 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，其中农田灌溉面积为 $2.618 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，耕地灌溉率为50%，接近全国平均水平（51%）。四川省农业灌溉年用水量约为 $1.545 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，占全省用水总量的61.2%，农田灌溉水有效利用系数仅为0.5^[12]，低于长江流域和全国平均水平（0.58），远低于世界节水先进水平（0.73）。

水稻是四川省最主要的粮食作物，种植面积约为 $2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，主要分布在成都平原区、盆地丘陵区、盆周山地区和川西南山地区。其中，优质稻种植面积稳步增加，已超过 $1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占比超过50%。全省水稻年产量为 $3.575 \times 10^7 \text{ t}$ ，平均单产为 $7.5 \sim 7.8 \text{ t/hm}^2$ ，年均增长率为0.22%。稻田灌溉水量约为 $8.34 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占总农业灌溉用水量的60%以上，稻田灌溉投入强度年平均增长率为2.92%^[13]。四川省主要种植区的水稻灌溉用水定额如表4所示。

干旱是最重要的气象灾害，严重制约了水稻生产，四川省春旱、夏旱、伏旱等灾害频发^[14]。四川省水稻灌溉多采用传统的深水淹灌、大水漫灌方式，常规中稻灌溉定额为 $7245 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，杂交中稻为 $8985 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。长期以来，传统淹水灌溉不仅导致水分利用率低下、灌溉水资源浪费严重，还带来农业面

表4 四川省水稻灌溉用水定额

灌溉分区	基本用水定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)		
	P=50%	P=75%	P=90%
盆西平原区（I区）	4800	5400	6000
盆中丘陵区（II区）	4050	4650	5250
盆南丘陵区（III区）	3900	5475	6450
盆东平行岭谷区（IV区）	4050	5325	57 000
盆周边缘山地区（V区）	5400	5700	6450
川西南中山山地区（VI区）	6150	7500	10 800
川西南中山宽谷区（VII区）	10 500	15 000	19 200

注：数据来自2021年《四川省用水定额》。

源污染。近年来推广应用的稻区间歇湿润灌溉条件下的灌溉水分生产力为 $1.4 \sim 2.8 \text{ kg/m}^3$ ，可减少灌水量10%~46%，提高灌溉水利用率21%~54%^[15]。控制性间歇灌溉起到扩“库”、增“源”作用，不仅增加水稻单株的有效穗数、结实率、千粒重（平均增产3.22%），还可提高水稻抽穗期的干物质积累量（11.53%）^[16]。

(四) 重庆市

重庆市位于长江上游，地处四川盆地，属亚热带季风性湿润气候，地貌类型以山地丘陵为主，土地类型多样并以紫色土居多。重庆市年均温度约为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ，年降水量为 $1000 \sim 1400 \text{ mm}$ ，年总日照时数为 $1000 \sim 1200 \text{ h}$ 。重庆市粮食作物以水稻、玉米、小麦、红薯为主，其中水稻播种面积为 $6.589 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占粮食作物总播种面积的32.73%；粮食总产量为 $1.093 \times 10^7 \text{ t}$ ，其中水稻产量为 $4.931 \times 10^6 \text{ t}$ ，相应占比为45.1%^[17]。水稻种植主要采用稻-油、稻-菜等轮作方式。

重庆市水稻主产区的灌溉保障率仅为50%，总灌溉用水量为 $3.776 \times 10^5 \text{ m}^3$ ；有效灌溉面积为 $7.094 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ；水稻灌溉水有效利用系数仅为0.55，也与世界先进水平（0.73）存在明显差距^[18]；水稻主产区化肥施用量为 $1.681 \times 10^5 \text{ t}$ ，化肥利用率为41.57%。稻田氮磷污染物是重庆市主要的农业水污染源，相应水污染物排放（流失）量为：氮氮量及其占比分别为 1607.64 t 、53.52%，总氮量及其占比分别为 $1.308 \times 10^4 \text{ t}$ 、59.14%，总磷量及其占比分别为 1464.72 t 、46.31%。重庆市水稻有效灌溉面积占比、灌溉水利用系数均偏低，农业面源污染较突出，亟需采用绿色高效灌排技术来提高水稻综合生

产力水平。

重庆市海拔相差悬殊，区域水热资源分布不均，水稻产区可分为4个区域，相应的水稻灌溉用水定额如表5所示。

表5 重庆市水稻灌溉用水定额

灌溉分区	基本用水定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)		
	$P=50\%$	$P=75\%$	$P=90\%$
渝西丘陵区 (I区)	6150	6675	7875
渝中平行岭谷区 (II区)	6150	6675	7725
渝东北秦巴山区 (III区)	6075	6900	7950
渝东南武陵山区 (IV区)	6150	6975	8175

注：数据来自《重庆市灌溉用水定额》。

三、西南水稻主产区的灌排现状

(一) 灌溉用水管理粗放

西南地区水稻栽培面积大、灌溉用水需求迫切，加之多受季节性干旱影响，补充灌溉是实现高产优质的重要保障。西南地区水稻生育期内有效降水多年均值为237.6 mm，需水量多年均值为304.5 mm，多年平均灌溉需水量为76.9 mm，多年平均灌溉需求指数为0.24^[19]。西南地区水稻水旱轮作区主要采用引水灌溉（占比为64.42%）、提水灌溉（占比为32.25%），而井水灌溉、蓄水灌溉较少^[20]。西南水稻主产区的灌溉技术落后，水稻灌溉以传统淹灌、大水漫灌为主。以四川省为例，2022年全省农业用水总量占全省用水总量的65.5%（全国均值为56.5%），其中稻田灌溉用水量占农业灌溉用水量的58.6%以上^[21]，水稻全生育期（除了晒田）的田面水深长期保持在5 cm以上，局部地区甚至连续漫灌数日，灌溉用水管理粗放，节水意识不足，亟需大力推广水稻节水灌溉技术。

(二) 蓄雨灌溉发展利好

目前，常用的灌溉技术有控制灌溉、间歇灌溉、浅湿灌溉、蓄雨灌溉等，这些技术应用对灌溉控制管理的要求较高，灌溉次数较多，只有在灌溉水源保证的情况下才有优势。然而，西南水稻主产区的地形以山地丘陵为主，地块零星分散，成片的保灌面积少，加之灌溉设施老化滞后。近年来调蓄水能力不足而干旱频发。西南地区年降雨丰沛，与水稻生长期基本同步，5—9月降雨量约占全年的

70%，因而蓄雨灌溉技术适应性强；该技术通常与其他灌排技术结合实施，降水时积蓄的水量可超过一般稻田灌溉管理中的蓄水上限，无降水时则按其他技术模式对稻田进行灌溉，节约灌溉用水，减少氮磷流失量，减轻面源污染。

(三) 水稻生产由水转旱

旱稻种植是适应云南高原生态农业特点的旱作节水种稻方式，可视为稻谷生产的创新方式。《云南省杂交水稻旱作技术指导意见》（2021年）提出，以海拔1700 m以下、雨热资源丰富的中低海拔区旱地作为重点种植区，应用杂交粳稻、杂交籼稻、陆稻等品种发展水稻旱作技术，2023年全省推广旱种面积 $6.667 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，新增稻谷产量 $3 \times 10^5 \text{ t}$ 。随后，云南省积极拓展杂交稻旱种示范面积，大面积示范的平均产量超过 6 t/hm^2 ，每公顷产值较种植玉米增加3000元以上。从品种、栽培模式、间套轮作等方面出发，强化技术集成，提高种植效益，形成科学的栽培技术模式，使旱稻种植成为调整种植结构、增加稻谷供给、稳定稻谷生产的有效途径。

(四) 农田退水污染突出

稻田退水污染指灌溉用水、降雨、高山雪水等水源在经过农田后发生侧渗，农田土壤中的氮磷养分及少量的有机物被带入水体中，导致水体富营养化构成水体污染。西南水稻主产区地形坡度大、降水量大、雨季集中，农田灌溉以大水漫灌居多；尤其是水稻生产过程中的泡田、人工排水、降雨径流等退水行为，甚至占到灌溉水量的1/4，容易引起养分流失和退水污染。以四川省为例，三大粮食作物的肥料损失率平均约为60%。此外，西南地区田块零碎、水低田高，灌排设施短板突出。兼有灌溉水调蓄、灌排两用沟渠、除涝排水作用的排水系统，依然是西南水稻主产区的“卡脖子”工程；渠（管道）、排水沟工程有待实施配套改造，“上通下阻”现象需要着重解决，涝排水标准也需逐步提高。

四、西南水稻主产区绿色高效灌排体系

(一) 绿色高效灌排体系的基本特征

西南水稻主产区绿色高效灌排体系构建面临严重的季节性干旱、涝渍和工程性缺水的多重挑战。

加强灌排工程体系建设、强化水资源调配能力、建设绿色高效灌排技术体系,是确保西南稻田主产区“旱能灌、涝能排”的关键举措。面对耕地分布破碎、土层浅薄、保水蓄水能力差、农田水肥时空异质性强、农业面源污染严重等问题,宜采用分布式、变量化、精量化的绿色灌排技术,切实提高灌排效率、水肥利用效率和农田水分生产力。开展“政产学研用”合作,协同推进西南地区农业绿色高效用水。

西南水稻主产区的农田面源污染严重,需集成高效灌溉、控制排水、农田面源污染物多级多过程生态消纳等技术,实施科学的稻田施肥管理,控制氮磷污染物排放强度;也需从源头减控,节水节肥节药,即减少稻田灌溉、化肥和农药的施用量,科学制定稻田施肥的结构、时间和用量。通过节水灌溉、控制排水、绿色生态减污等技术的集成应用,降低氮磷负荷排出,改善农田环境,提升水肥利用效率。

西南水稻主产区传统田间灌排管理模式灌水量偏高,适度的“调亏和蓄”灌排技术在节水节肥的同时,既充分利用水稻的耐旱性能、减少灌水次数、优化田间土肥环境,又很好发挥水稻的耐淹性能,最大限度利用天然降水。水稻绿色高效灌排技术模式充分吸收“调亏和调蓄”灌排技术的优点,为水稻各生育期生长提供良好的稻田水肥热微环境,利于水稻节水丰产。

(二) 绿色高效灌排技术

1. 高效灌溉技术

浅湿晒灌溉技术是我国应用时间最久、应用区域最广的水稻高效灌溉技术模式,操作较为简单,但对田块要求较高^[22]。浅湿晒灌溉技术的水分控制标准为:薄水插秧(保持15~20 mm),浅水返青(保持20~40 mm),分蘖前期湿润(田间无水层时每次灌水20~30 mm),分蘖后期晒田,拔节孕穗期保持20~30 mm薄水层,抽穗扬花期保持2~15 mm薄水层,乳熟期湿润(灌跑马水),黄熟期湿润,自然落干。

间歇灌溉技术也称干湿交替灌溉,在一段时间内保持浅水层,经自然落干后再复水;可以增强稻田土壤的透气性,减少病虫害发生,提高水稻在生长后期的抗旱能力,达到节水稳产甚至节水增产

的目的^[22]。然而,在干湿交替过程中为了保证土壤含水率不过度降低(通常保持在田间持水量的85%以上),需要按照较短的周期进行稻田的阶段性供水,导致操作较为复杂;虽然可以显著节约灌溉用水,但增产效果不稳定,仅适用于水资源不充沛的山地丘陵区。间歇灌溉技术的水分控制标准为:在返青期每次灌溉30~70 mm,稻田水层维持在20~50 mm,经自然落干后再灌溉,分蘖后期晒田,黄熟期停止灌溉,自然落干^[22]。

控制灌溉技术基于水稻在不同生育期对水分的敏感性进行适时适量的灌溉,在水稻非需水敏感期施加适当干旱胁迫,提高水稻抗逆性,最大程度发挥水稻节水潜力,兼顾节水节能和高产高效。充分了解水稻在不同生育期对水分亏缺敏感性与最佳水分亏缺程度是控制灌溉技术实施的前提,导致操作较为复杂,仅适用于灌溉设施相对完备的地区。控制灌溉技术的水分控制标准为:一种是在插秧至返青期建立约25 mm的水层,其他时期根据土壤含水率控制上下限进行灌溉(上限为田间持水量,下限为田间持水量的70%左右);另一种是在返青期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期分别灌溉1次、3次、1次、1次、1次,相应的灌溉用水定额分别为40 mm、94 mm、22 mm、23 mm、9 mm。

蓄雨灌溉技术指在不影响水稻产量的前提下,尽可能多地积蓄雨水、增加田面蓄水深度,以延长灌水周期、减少灌溉次数,充分提高雨水利用率并显著减少灌溉量。相比常规灌溉,西南水稻主产区应用蓄雨灌溉技术可节水34%、增产12%、减少灌水3次^[23]。蓄雨灌溉技术的水分控制标准为:对于移栽-返青期、分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗扬花期、乳熟期、黄熟期,最高拦蓄雨量分别为60 mm、60 mm、0 mm、70 mm、50 mm、50 mm、20 mm;在返青期,常规灌排条件下的蓄雨上限为40~50 mm,而浅湿灌溉、湿润灌溉等优化灌排条件下的蓄雨上限为80 mm;在分蘖期,常规灌排条件下的蓄雨上限为50~80 mm,考虑蓄雨间歇灌溉的蓄水上限水位为100~200 mm。

2. 控制排水技术

水稻田地面平整,在围垄的保护下易于形成封闭的径流体系,具有吸收、固定、降解水体中氮磷等营养物的功能^[24],因而控制稻田排水及养分流失

具有良好的可行性。在西南水稻主产区综合应用节水灌溉、控制排水等技术，可大幅减少稻田排水量和氮磷负荷，形成显著的节水减污效应^[25,26]，有效控制面源污染。通过农田控制排水、沟道控制排水等的协同作用，使农田和农沟发挥湿地效应，减少排水量及氮磷浓度，降低污染物负荷^[27]。

西南水稻主产区的稻田控制灌排模式具体为：返青期田面保留10~30 mm薄水层，其余各生育期内根层土壤水分占田间持水量的60%~80%，灌溉后稻田不建立水层；在农沟布置闸门，拦蓄稻田排水，水蓄满后自动溢流，在分蘖末期、黄熟期直接排水至生态水位（以满足排水沟最低生态需水量为要求，沟中保持10 cm水位），其余阶段以田面控制低点作为排水上限。在控制灌排模式下，农沟排水集中发生在返青期、拔节孕穗期、乳熟期，其余生育期内均较低。在水稻全生育期内，采用控制灌排模式的农沟排水量较常规灌排模式可减少8232 m³/hm²，降幅为50.6%；农沟排水量在水稻返青期和分蘖前期较常规灌排模式合计减少3409.1 m³/hm²，降幅为57.9%，显著减少了关键期内导致稻田氮磷流失的农沟排水量，有效控制了稻田排水对周边水体的面源污染量。

（三）绿色高效灌排模式

1. 稻田精准需水预报

水稻灌区的灌水预报应结合实际获得的天气预报数据，计算参考作物蒸发蒸腾量。相应计算方法有联合国粮食及农业组织（FAO）-PM法、简化PM法、哈格里夫斯法以及新兴的人工智能（AI）算法。进一步结合单作物系数法或双作物系数法，预测水稻在预报期内的逐日蒸发蒸腾量。其中，作物系数应采用当地灌溉试验得到的结果，缺乏灌溉试验结果的可以参考FAO-56文件，按气候条件相似区域进行取值。

2. 灌区精量配水管理

高新信息技术在农业高效用水管理中的应用更为广泛，支持了灌区精量配水。随着基于AI算法的灌区需水预测技术、配水优化技术、灌区用水管理系统的规模化应用，灌区用水管理实现了由静态用水向动态用水的转变、灌溉输配水优化的全过程控制。根据灌区用水管理的实际情况，将灌区按照支、斗、农渠系或者县、乡、村行政区域进行划

分，形成相对独立的用水计算单元，利于灌区供需水量调查、水量优化配置等用水管理。当灌区的灌溉供水不足时，依据灌区作物的种植结构、需水规律以及非充分灌溉制度，优先保障主要作物的需水关键期供水；以灌区经济效益最大化为目标，根据数学模型的模拟结果，对有限灌溉水量在灌区内各用水单元间进行优化配置。

在确定灌区内各用水单元的逐时段（旬、月）配水量后，按照配水量不能超过渠系最大设计流量的原则，分配各级渠道的配水流量；优先保障水稻的需水关键期供水，合理安排配水时间，充分利用灌区已有供水设施，缓解高峰供水压力。在执行过程中，可根据实际供水量在各用水计算单元的分配情况进行灵活调整，根据灌区实际用水情况逐时段（旬、月）制定精量灌溉配水计划。

3. 稻田高效用水管理

作物用水过程的量化表征是开展作物高效用水调控的重要基础。水稻高效用水是西南水稻主产区田间高效用水的基础。以作物生理需水规律为基础，解析叶片尺度光合-气孔-蒸腾耦合机理，构建作物气孔-光合-蒸腾生理学模型。

通过灌排试验获得水稻各生育期的最适土壤含水率，将预测的逐日土壤含水率与最适区间对比，在预测值低于最适区间下限值时实施灌水，灌水量为最适区间的上限值与预测值的水量差。灌溉决策还需考虑水稻的耐旱程度、施肥打药等农艺措施，再进行适当的灌水时间和灌水量调整。在灌水日往后48 h内有中雨以上降雨时、未来5 d内遇到暴雨降雨时，考虑稻田容蓄降雨条件，实施取消灌水、延后灌水时间、降低灌水定额等措施，尽量避免产生稻田排水。

4. 稻田高效排水管理

稻田高效排水技术模式分为：包括雨水收集及再利用、坡地径流收集与再利用、稻田排水的梯级利用、农田退水收集及回用、深浅沟在内的循环利用技术，以生态沟渠、湿地净化为代表的净化技术，稻田退水零直排技术等。

稻田排水是为了满足水稻生长对土壤湿度和通气的需要以及田间作业的通行条件，较少考虑排水对环境的影响以及雨水资源有效利用。通过地表径流、地下排水（淋溶）流失进入环境水体，是稻田氮磷污染产生的主要途径。稻田控制排水可减少地

面排水量、排水中的氮磷浓度，尤其是降低径流中的氮磷浓度、减少稻田氮磷损失。通常在农田排水口修建控制建筑物来控制排水沟的水位。

沟渠水塘能够有效截留降雨径流和稻田排水，利用湿地生态系统的物理、化学、生物作用降低水中营养物质浓度。水塘横断面积急剧增加，可降低径流流速和水流挟沙能力，使悬浮物在水塘中大量沉降，从而减少非点源污染物输出。沟渠湿地中自然生长的水生植物，除了以直接同化、吸附、微生物作用等方式吸收水体中的污染物，还通过减慢水流速度、增大紊流及水深、延长水力停留时间等形式，创造有利于污染物消解及吸收的水力条件。沟渠湿地截留并净化氮磷物质的主要途径是底泥吸附、水生植物吸收、微生物转化、根区反应等。

稻田退水零直排^[29]综合利用农田水利学与生态学原理进行污染物阻隔，对稻田退水进行拦截减污，使稻田退水不直接汇入周围受纳水体，而是经调蓄处理、灌溉回用后实现农业退水的超低排放。根据西南地区各地的自然条件，划分了稻田退水零直排的开放型、半封闭型、全封闭型工程建设模式，形成了“农田-生态沟拦截-生态调蓄塘-‘三池两坝’（沉淀池-过滤坝-曝气池-过滤坝-净化池）-生态净化带-受纳水体”技术体系。这有助于促进稻田退水中氮磷流失减排与资源循环利用，支持区域农业绿色优质发展。

五、西南水稻主产区绿色高效灌排技术应用建议

（一）研发稻田灌排高效协同调控新技术，提高稻田高效节水灌溉技术水平

节水灌溉稻田在水稻全生育期内会有较长时段处于无水层状态，应用基于地下水调控的控制排水技术对于稻田控制排水具有重要意义。强化节水灌溉技术、控制排水技术的协同研究，探明二者共同作用下稻田土壤水热变化、水量平衡要素的响应机制，分析“控制灌溉”“间隙灌溉”“浅薄湿晒”等节水灌溉技术与“适宜地下水埋深”“控制地下水埋深”“大田地下水埋深”等控制排水技术组合调控下，水稻耗水变化特征，根系发育、吸水能力、光合指标、后期产量与水利用效率响应，构建适宜的稻田灌排高效协同调控技术模式，促进西南地区节

水节肥、增产增效型水稻生产。

（二）推广绿色高效灌排技术体系，推进水稻节水增产提质与降排减污

基于 PM 公式、AI 算法开展水稻需耗水预报，结合西南水稻主产区的气候条件进行灌溉制度优化，确定适宜的灌溉阈值与时间，最大限度节约灌溉用水，因地制宜应用浅湿晒灌溉、间歇灌溉、控制灌溉、蓄雨灌溉等水稻节水灌溉模式，提高西南水稻主产区的水稻产量与水分利用效率，实现节水增产提质。拓展应用田间高效节水灌溉、肥料减施、控制排水、农田污染物多过程消纳一体化的稻田节水减污技术，构筑源头节水减施、排水沟消纳、塘堰湿地消纳 3 道防线，减少西南水稻主产区的稻田排水面源污染，促进西南水稻主产区的减排减污和农田环境改善。

（三）优化水肥运筹模式，提高稻田水肥利用率

应用 DSSAT、WOFOST 等作物模型，优化灌溉施肥模式，开展精准灌溉施肥管理，显著提升稻田水肥利用率，在源头上遏制稻田氮磷流失。加强测土配方施肥，推广使用缓控释氮肥、有机肥代替化肥和前氮后移技术来提高稻田养分利用率。改良有机物料还田技术，推广秸秆覆盖和秸秆炭化还田，增施硫酸铵、土壤添加剂、硝化抑制剂等减排产品，促进稻田温室气体减排，提高土壤培肥和肥料利用率。兼顾西南地区生态保护红线，综合节水灌溉、控制排水、污染物生态拦截等技术，加强稻田退水零直排工程与农田排水系统拦截基质资源化利用等的有效衔接，建立西南水稻主产区绿色生态的农田协同高效灌排系统。

（四）开发稻田智能灌溉系统，推动稻田智慧灌溉

在西南水稻主产区结合“互联网+”技术推行稻田信息化管理，实时监测稻田水分亏缺信息，准确分析和评价水稻生长与水分亏缺状况；挖掘大区域稻田高效用水机理，融合稻田最优灌溉模式、物联网、对地遥感等技术，支持分布式、变量化精量智慧灌溉决策，提升水稻的产量、品质以及水分利用效率。合理确定灌水时间、灌水次数和灌水量，精准计算水稻不同生育期需水量，以根层土壤含水率或适宜水深作为水稻田灌溉控制指标，指导稻田

精准灌溉。推动水稻灌溉管理由传统的粗放式、经验型转向基于水稻不同生育期生理需水需肥规律，构建标准化、变量化、智能化的绿色灌溉系统。

(五) 应用稻田信息化管理体系，在灌区尺度上实现高效精量智慧灌溉用水管理

综合应用物联网、无人机遥感、AI等技术，实现西南水稻主产区内灌区灌溉水资源的科学化管理与精细化分配。基于气象数据、多源遥感数据和智能算法，优化水稻需水量模型经验参数，根据卫星遥感数据反演水稻灌区土壤水分数据并改进双作物系数，解析大区域尺度作物系数空间异质性，建立基于多源遥感的稻田灌溉需耗水预报方法。基于物联网、边缘服务器、云端服务器，建立灌区尺度的智慧灌溉信息云服务平台，提供稻田灌溉试验数据、不同品种的种植结构、农田需耗水时空格局、区域可供水量等信息服务。融入云端作物模型、系统动力学模型、模糊层次分析模型，开展灌区尺度多情景水量配置方案的灌溉效应综合评价，形成具有稻田水分亏缺信息动态诊断、精量灌溉决策、灌区尺度水量优化配置与服务“云边端”一体化功能的智能灌溉用水管理体系。

(六) 构建立体多维的技术推广体系，推动西南水稻主产区绿色高效用水

基于国家-省-市-县四级联动的农业（水利）技术推广体系，在西南水稻主产区内以技术培训指导、案例视频等形式开展技术推广。加快西南水稻主产区高效灌排示范区建设，引导种植户掌握先进技术，发挥辐射带动作用。制作绿色高效灌排技术“一图读懂”系列图解与宣传手册，广泛开展宣传推广，在现场观摩会、线下培训会、设备推介会等渠道开展定向宣传，扩大辐射带动范围。制定稻田高效灌排技术标准，组织开展培训与学术交流，通过各级媒体报道稻田相关技术与装备发展成果。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 16, 2023; **Revised date:** April 1, 2024

Corresponding author: Gong Daozhi is a research fellow of Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences. His major research field is agricultural water resources and environment. E-mail: gongdaozhi@caas.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Green and Efficient Water Use Mechanism and Drought Resistance and Disaster Reduction Strategy for Agriculture in Seasonal Arid Areas of Sichuan Province” (2023-DFZD-31); National Natural Science Found Project (52309056); Sichuan Science and Technology Planning Project (2023YFQ0034)

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook—2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 李敏, 蒋明金, 罗德强, 等. 西南稻区高产优良食味杂交水稻品种筛选 [J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(3): 338–345.
Li M, Jiang M J, Luo D Q, et al. Screening of hybrid indica rice varieties with high yield and good taste in Southwest rice region [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(3): 338–345.
- [3] 徐精文, 杨文钰, 任万君, 等. 川中丘陵区主要农业气象灾害及其防御措施 [J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 49–52.
Xu J W, Yang W Y, Ren W J, et al. Major agrometeorological disasters in the hilly region of the middle Sichuan and their preventive measures [J]. Agricultural Meteorology, 2002, 23(3): 49–52.
- [4] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development [J]. Nature, 2015, 528(7580): 51–59.
- [5] 董瑜皎. 覆膜综合栽培技术对西南丘陵区水稻产量、土壤水热过程和作物氮素利用的影响机理 [D]. 北京: 中国农业大学(博士学位论文), 2019.
Dong Y J. Effects of integrated plastic mulch rice management on yield, soil temperature and water content, and crop nitrogen use in the hilly area of Southwest China [D]. Beijing: China Agricultural University (Doctoral dissertation), 2019.
- [6] 刘辉. 成渝地区水稻种植户化肥减量施用行为研究 [D]. 重庆: 西南大学(硕士学位论文), 2022.
Liu H. Research on chemical fertilizer application behavior of rice farmers in Chengdu–Chongqing region [D]. Chongqing: Southwest University (Master’s thesis), 2022.
- [7] 云南省水利厅. 2022年云南省水资源公报 [EB/OL]. (2023-11-13)[2024-03-15]. http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/shuiziyuangongbao-tongji_1113/57700.html.
Yunnan Provincial Water Resources Department. Yunnan Province water resources bulletin 2022. [EB/OL]. (2023-11-13)[2024-03-15]. http://wcb.yn.gov.cn/html/2023/shuiziyuangongbao-tongji_1113/57700.html.
- [8] 国家统计局云南调查总队. 云南调查年鉴—2023 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Yunnan General Investigation Team of the National Bureau of Statistics. Yunnan Province survey yearbook—2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [9] 贵州省水利厅. 2022年贵州省水资源公报 [EB/OL]. (2023-12-01)[2024-03-15]. http://www.guizhou.gov.cn/zwgk/zdlygk/jjzlfz/sjls/szygl/202312/t20231201_83166779.html.
Guizhou Provincial Water Resources Department. Guizhou Province water resources bulletin 2022 [EB/OL]. (2023-12-01)[2024-

- 03-15]. http://www.guizhou.gov.cn/zwgk/zdlygk/jjgzlfz/sljs/szygl/202312/t20231201_83166779.html.
- [10] 国家统计局. 中国统计年鉴—2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook—2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [11] 贵州省质量技术监督局. 贵州省行业用水定额 第一部分: 农业灌溉用水定额分册 [EB/OL]. (2018-03-29)[2024-03-15]. <http://www.jsgg.com.cn/Files/PictureDocument/20181109191552826323636397.pdf>.
Guizhou Quality and Technical Supervision Bureau. Water use quotas for industries in Guizhou Province part I: Water use quotas for irrigation in agriculture [EB/OL]. (2018-03-29)[2024-03-15]. <http://www.jsgg.com.cn/Files/PictureDocument/20181109191552826323636397.pdf>.
- [12] 李晓鹏. 四川省水资源统一调度管理的探索与思考 [J]. 四川水利, 2021, 42(1): 1–3.
Li X P. Exploration and thinking on unified dispatching management of water resources in Sichuan Province [J]. Sichuan Water Resources, 2021, 42(1): 1–3.
- [13] 龙静雯. 四川省稻田生态系统碳足迹及减排政策研究 [D]. 雅安: 四川农业大学(硕士学位论文), 2020.
Long J W. Carbon footprint of rice ecosystem in Sichuan Province and its countermeasures [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University (Master's thesis), 2020.
- [14] 陈超, 庞艳梅, 徐富贤, 等. 四川水稻不同生育阶段的干旱风险评估 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 184–193.
Chen C, Pang Y M, Xu F X, et al. Risk assessment of drought on rice at different growth stages in Sichuan Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 184–193.
- [15] 李永松, 陈基旺, 袁帅, 等. 节水灌溉对水稻产量和根系的影响研究进展 [J]. 作物研究, 2020, 34(2): 176–182.
Li Y S, Chen J W, Yuan S, et al. Research progress on effect of water-saving irrigation on yield and roots of rice [J]. Crop Research, 2020, 34(2): 176–182.
- [16] 张绍文. 水氮运筹对杂交籼稻产量形成及氮素利用特征的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学(硕士学位论文), 2017.
Zhang S W. Effects of water-nitrogen managements on grain yield formation and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University (Master's thesis), 2017.
- [17] 国家统计局重庆调查总队, 重庆市统计局. 重庆调查年鉴—2023 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
Chongqing General Investigation Team of the National Bureau of Statistics, Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing City survey yearbook—2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [18] 重庆市水利厅. 2022 年重庆市水资源公报 [EB/OL]. (2023-10-09)[2024-03-15]. http://slj.cq.gov.cn/zwgk_250/fdzdkgkr/tjgb/szygb/202310/t20231009_12411755.html.
Chongqing Water Resources Department. Chongqing City water resources bulletin 2022 [EB/OL]. (2023-10-09)[2024-03-15]. http://slj.cq.gov.cn/zwgk_250/fdzdkgkr/tjgb/szygb/202310/t20231009_12411755.html.
- [19] 符娜, 刘小刚, 张岩, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1895–1901.
Fu N, Liu X G, Zhang Y, et al. Variation pattern of rice irrigation water requirement in Southwest of China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1895–1901.
- [20] 于伟咏, 漆雁斌, 韦锋, 等. 水旱轮作模式和灌溉方式对西南地区水稻灌溉用水效率的影响 [J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1127–1136.
Yu W Y, Qi Y B, Wei F, et al. The impact of FDD rotation mode and irrigation methods on rice irrigation water efficiency in Southwestern China [J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1127–1136.
- [21] 罗万琦, 吕辛未, 吴从林, 等. 中国主要稻区水稻灌溉需求变化及其规律分析 [J]. 节水灌溉, 2021 (12): 1–7.
Luo W Q, Lyu X W, Wu C L, et al. Analysis of rice irrigation demands and its change law in major rice areas of China [J]. Water Saving Irrigation, 2021 (12): 1–7.
- [22] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 等. 水稻节水灌溉技术模式研究进展 [J]. 节水灌溉, 2021 (8): 19–24.
Ma S H, Yang C, Wang G B, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode [J]. Water Saving Irrigation, 2021 (8): 19–24.
- [23] 张宝忠, 彭致功, 雷波, 等. 我国典型作物用水特征及现代农业灌溉技术模式 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 77–83.
Zhang B Z, Peng Z G, Lei B, et al. Water use features of typical crops and technical modes of modern agriculture irrigation in China [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 77–83.
- [24] 朱金城. 江苏扬州稻田控制排水及养分流失试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学(硕士学位论文), 2017.
Zhu J C. Experimental study on controlled drainage and nutrient loss in rice field in Yangzhou, Jiangsu Province, China [D]. Yangzhou: Yangzhou University (Master's thesis), 2017.
- [25] 王少璞, 许迪, 陈皓锐, 等. 农田除涝排水技术研究综述 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 343–349.
Wang S L, Xu D, Chen H R, et al. Review on research of farmland drainage technology [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 343–349.
- [26] 和玉璞, 徐俊增, 杨士红, 等. 灌排调控模式对稻田排水过程的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 348–351.
He Y P, Xu J Z, Yang S H, et al. Effects of different irrigation and drainage practices on drainage process in paddy fields [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 348–351.
- [27] 江颢伟, 杨士红, 丁洁, 等. 基于 DNDC 模型的不同水文年稻田水碳管理模式优化 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 93–102.
Jiang Z W, Yang S H, Ding J, et al. Optimization of water and carbon management modes for paddy fields in different hydrological years based on the DNDC model [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 93–102.
- [28] 梁新强, 杨姣, 何霜, 等. 关于长江三角洲地区推进稻田退水零直排工程建设的建议 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(7): 814–822.
Liang X Q, Yang J, He S, et al. Promoting construction of zero-direct discharge engineering for agricultural wastewater from paddy fields in Yangtze River Delta Region [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(7): 814–822.