

水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度

朱嘉伟, 赵聪佳, 郭蕊蕊, 周琳琳

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 在高效节水灌溉工程技术难以在大田作物中推广应用的形势下, 优化制定节水灌溉制度是提高灌溉水利用效率的可行途径。该研究以河南省新郑市为研究区, 在对冬小麦全生育期及不同生育阶段的作物需水量、天然供水量、灌溉需水量进行估算的基础上, 针对农田灌溉水源不足的条件约束, 以冬小麦产量最大化为目标, 采用 Jensen 模型反向求解法, 将现有的冬小麦水分敏感性研究成果应用于非引灌区县域节水灌溉制度的制定, 通过实施非充分灌溉制度, 缓解水资源供需矛盾。结果表明: 1) 新郑市平水年和干旱年冬小麦全生育期供水总量小于需水总量, 难以满足农田灌溉需求, 需要实施非充分灌溉制度; 2) 采用 Jensen 模型不能直接优化解算冬小麦不同生育期的灌水定额, 但是可以通过优化解算出的冬小麦不同生育期的腾发量间接确定灌水定额; 3) 优化解算得冬小麦苗期、越冬、拔节、抽穗、灌浆等不同生育期的腾发量占全生育期的比例分别为 15.8%、5.4%、23.4%、34.9%、20.5%, 与不同生育期敏感性指数的大小成正比; 4) 新郑市冬小麦丰水年灌溉关键期为灌浆期, 平水年灌溉关键期为抽穗期和灌浆期, 干旱年灌溉关键期为抽穗期, 但是苗期、拔节、灌浆期均需要适量灌溉。该研究表明采用 Jensen 模型反向求解法可优化确定冬小麦不同生育期的灌水定额, 研究提出的非充分灌溉制度制定方法对推进现有理论研究成果在农田灌溉实际工作中的应用具有重要的实践意义。

关键词: 灌溉; 作物; 节水; 非充分灌溉; 灌溉制度; 河南省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.012

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-01-0092-09

朱嘉伟, 赵聪佳, 郭蕊蕊, 等. 水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 92-100.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.012 <http://www.tcsae.org>

Zhu Jiawei, Zhao Congjia, Guo Ruirui, et al. Water-saving irrigation regime for winter wheat in county areas under water resources constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 92-100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是一个水资源短缺的农业大国, 尤其是北方地区, 农田灌溉水资源短缺问题尤为突出, 近半数的耕地没有灌溉条件, 在井灌区地下水超采严重, 不仅制约了农业的发展, 而且引发了地面沉降等生态环境问题^[1-2]。在水资源刚性约束条件下, 要保证国家粮食安全, 有效增加灌溉面积, 必须实施节水灌溉^[3]。中国自 20 世纪 90 年代初期已开始推广农业节水灌溉技术, 自 2005 年开始中央一号文件连续多年强调要积极发展节水旱作农业, 加强灌溉用水计量, 扩大灌溉面积, 但是在农田作物节水灌溉方面依然进展缓慢^[3]。原因主要有 2 个方面: 一是田间节水灌溉工程技术在大田作物灌溉中推广难度大^[4]; 二是在灌溉管理工作的实践中, 非充分灌溉、调亏灌溉等节水灌溉研究成果未能得到推广应用。致使目前大田作物生产中, 普遍存在因水源不足而放弃灌溉的严重问题。

推广应用高效节水灌溉技术是解决农田灌溉水源不足的重要途径, 但是微、喷灌节水灌溉工程技术投资高, 且在耕作中容易损毁, 维护困难, 一般只适宜于林果、蔬菜等经济作物, 并不适宜于小麦、玉米等大田作物, 预计

在未来较长时期内仍难以在大田作物中得到推广应用^[4-5]。地面灌溉是一种传统的大田灌水方法, 虽然水的利用效率较低, 但它仍然是目前世界上广泛采用的一种灌水方法, 在高效节水灌溉工程技术难以在大田作物中推广应用的客观形势下, 通过优化节水灌溉制度, 推广节水型地面灌溉制度是实施大田作物节水灌溉的可行途径^[4-5]。近年来, 随着非充分灌溉理论研究的不断深入, 取得了大量的研究成果^[6-12], 为节水灌溉制度的制定奠定了基础, 但是, 前人所做的研究主要集中在灌水量与产量间的关系及作物水分生产函数研究方面, 而将这些理论研究成果反过来应用于农田灌溉管理工作实践的应用性研究却很少^[13-21]。史源等^[1,22-24] 在中国北方不同地区开展过小麦灌溉制度的优化研究, 但是研究工作主要是对设定不同灌溉制度的对比试验或情景模拟, 通过对比分析提出较优灌水方案, 并未给出具体的求解方法, 本次研究以冬小麦产量最大化为目标, 采用 Jensen 模型反向解算方法, 求解最优灌水方案, 将理论研究成果应用于农田灌溉管理工作的实践中, 对推进现有研究成果的转化应用意义重大。

河南省是中国粮食生产大省, 2019 年粮食产量占全国粮食总产量的十分之一, 其中小麦总产量约占全国小麦总产量的近三分之一。但是, 河南中部和北部广大的冬小麦种植区, 冬小麦生育期大气降水很难满足作物需水要求, 作物生长对灌溉依赖程度高, 而农田区可利用水资源量普遍小于灌溉需水量^[25], 农田灌溉水源短缺、

收稿日期: 2020-06-14 修订日期: 2020-09-11

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项课题 (201411022-03)

作者简介: 朱嘉伟, 博士, 副教授, 研究方向为土地资源调查评价与规划。

Email: Zhujiw686@163.com

灌水效率低下是造成小麦产能不稳的根源所在。本文针对河南省非引灌区农田灌溉水源有限，高效节水灌溉工程技术在大田作物灌溉中难以推广应用的双重约束，以河南省土地综合整治技术推广应用试验区新郑市为研究区，在收集利用县域气象、农林、水利、国土资源等不同部门调查、观测成果资料^[26-27]的基础上，充分利用冬小麦水分敏感性研究成果^[6-9]和田间试验研究成果^[16-18]，以冬小麦产量最大化目标，采用 Jensen 模型求解法，将有限的水资源量优化分配至冬小麦的不同生育阶段，通过制定冬小麦非充分灌溉制度以提高灌溉水利用率，缓解水资源短缺对冬小麦生产的约束。

1 研究区概况

1.1 基本概况

新郑市位于河南省中部，隶属于郑州市管辖。全市土地总面积为 $8.85\times10^4\text{ km}^2$ ，其中：农用地面积 $6.51\times10^4\text{ km}^2$ ，占土地总面积的 73.54%；农用地中耕地面积为 $5.37\times10^4\text{ km}^2$ ，占土地总面积的 60.65%。

新郑市地处河南东部平原与西部山地的过渡地带，地貌类型复杂多样，山地、丘陵、岗地和平原兼有，素有“中原缩影”之称。山地和丘陵集中分布在西南部和西部，岗地主要分布在山丘外围和中部地带，占土地总面积的 38.11%，其中山地占 4.97%，丘岗地占 33.14%，岗地系早期山前洪积倾斜平原，大部分为第四纪黄土覆盖；平原多集中于京广铁路以东，占土地总面积的 61.89%，其中京广铁路以西为山前冲积微倾斜平原，约占土地总面积的 14.49%，京广铁路以东为黄河泛滥冲积平原区，属黄淮平原的西北边缘部分，占土地总面积的 47.40%，其中分布有大量低缓的沙丘岗地。不同地貌类型区土壤质地差异明显，壤土占农田区的比例约为 44.3%，主要为分布于京广铁路以西的坡岗地和山前冲积平原区；沙壤土、面沙-细沙土占农田区的比例分别为 39.8%、15.9%，主要为分布于京广铁路以东的黄泛平原区和沙丘岗地区^[26]。壤土区成土母质为坡积物和山前冲积物，土壤透水性较弱，持水性较好，渗透系数 k 值为

0.25~0.5 m/d，给水度 μ 值为 0.033~0.053；沙壤土、面沙-细沙土区成土母质主要为粉土、粉细砂及细砂，土壤透水性较强，持水性较差，渗透系数 k 值为 0.5~8 m/d，给水度 μ 值为 0.041~0.067^[27]。

区内气候为暖温带大陆性季风气候，多年（1956—2015 年）平均降水量为 627.1 mm，多年平均气温 14.2℃，光热条件适宜多种农作物生长，为河南省粮食生产核心区，2018 年粮食总产量为 $26.77\times10^4\text{ t}$ 。

1.2 农田灌溉可利用水资源量

农田灌溉可利用水资源量是节水灌溉制度制定的基础依据。新郑市为非引灌区，农田灌溉缺乏引灌水源，灌溉水源主要为浅层地下水和蓄积雨洪水源，不同地区水资源禀赋条件差异较大。黄河冲积平原、山前平原-岗地区以井灌为主，灌溉水源为浅层地下水；山地和丘陵区以旱作为主，浅层地下水可利用模数小，潜水面埋藏深度普遍大于 50 m，地下水补给条件差，不适宜开采利用，农田灌溉主要依靠修建小型蓄水工程蓄积雨洪水源。依据浅层地下水资源可利用模数的大小^[27]和土壤质地差异，可将新郑市划分为黄泛平原灌溉区、山前平原灌溉区和山丘缓坡灌溉区三大灌区。

地表水资源主要来源于蓄积雨洪资源。降水量在年际间变化大，变差系数为 22%。25%、50%、75%降水保证率的年降水量分别为 723.8、614.8、465.5 mm。依据《新郑市 1:10 万水文地质调查报告》，新郑市由山丘区至平原区，地表径流量逐渐减少，南部山丘区、西北部岗地区、中东部平原区多年平均地表径流系数分别为 0.41、0.21、0.18。平原（岗地）区为井灌区，不考虑蓄积利用地表水；山地和丘陵缓坡农田区浅层地下水埋藏深、可利用模数小，农田灌溉水源主要为蓄积大气降水，雨洪资源蓄积采用在田间地头修建小型蓄水池工程蓄积田面渗余降水，蓄水工程按 75%降水保证率设计，田面径流系数参照平原区取 0.18，则 75%保证率农田区地表水径流深度为 83.8 mm，以拦蓄利用率为 75%估算，则农田区可蓄积利用的地表水资源模数为 $628\text{ m}^3/\text{hm}^2$ （表 1）。

表 1 新郑市不同农田灌溉区可利用水资源量
Table 1 Available water resource of different farmland irrigation areas in Xinzheng City

农田灌溉分区 Farmland irrigation areas	地表水 Surface water				地下水 Ground water			水资源可利用模数 Total available water resource module/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌区类型 Irrigation types
	降水量 Precipitation/ mm	径流系数 Runoff coefficient	水资源模数 Water resource module/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	可利用模数 Available water resource module/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	水资源模数 Water resource module/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	水位埋深 Buried depth of groundwater level/ m	可利用模数 Available water resource module/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)		
黄泛平原灌溉区 Yellow River flood plain irrigation area	465.5	0.18	838	难利用	1438	5~10	1 222	1 222	井灌
山前平原灌溉区 Piedmont plain irrigation area	465.5	0.18	838	难利用	840	15~50	714	714	井灌
山丘缓坡灌溉区 Hillside gentle slope irrigation area	465.5	0.18	838	628	335	>50	难利用	628	蓄水灌溉

依据《新郑市 1:10 万水文地质调查报告》^[27]，新郑市多年平均浅层地下水资源量为 $9\,479.69\times10^4\text{ m}^3$ ，可利用量为 $7\,847.24\times10^4\text{ m}^3$ ，可利用模数平均值为

$885\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。其中：黄泛平原灌溉区浅层地下水资源可利用模数为 $1\,222\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，区内浅层地下水补给条件好，水位埋深浅（<10 m），适宜作为农田灌溉水源；山前平原

灌溉区浅层地下水可利用模数为 $714 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤质地为沙壤土，大气降水补给条件较好，地下水水位埋深较浅 ($<30 \text{ m}$)，适宜作为农田灌溉水源；山丘缓坡灌溉区浅层地下水可利用模数为 $235 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤质地壤土，地下水水位埋深 ($>50 \text{ m}$)，大气降水补给条件差，可利用模数小，不适宜作为农田灌溉水源开发利用。

综上所述可看出，新郑市黄泛平原灌溉区、山前平原灌溉区和山丘缓坡灌溉区三大灌区，农田灌溉可利用水资源模数分别为 $1\,222$ 、 714 、 $628 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，黄泛平原灌溉区、山前平原灌溉区可利用水资源为地下水，山丘缓坡灌溉区可利用水资源为地表水（表 1）。

2 农田灌溉需水量分析

冬小麦全生育期作物需水量与全生育期有效降水量和播种时土壤底墒间的差值为灌溉需水量，当可利用水资源量小于灌溉需水量时，需要将有限的水资源优化分配冬小麦不同生育期，以提高水资源的利用效率，节约利用有限的水资源。

2.1 作物需水量

作物需水量可采用通过直接试验或间接计算 2 种方法求得，鉴于气象资料易于获取，建议在求取不同地区作物需水量时采用间接计算法。

前人曾采用间接计算法求得了研究区冬小麦全生育期的作物需水量，本次研究拟直接引用前人计算结果。马志红等^[28]采用 FAO1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式，利用河南省各站点多年旬平均气象资料，首先计算出河南省冬小麦参考作物腾发量 ET_0 ，然后根据河南省气象科学研究所^[29]和水利部农田灌溉研究所^[30]提供的冬小麦全生育期腾发量修订系数 ($K_c=0.876\sim1.01$)，对 ET_0 进行订正后得到了河南省冬小麦农田潜在腾发量 ET_c （即需水量），其中新郑市 ET_c 值为 425 mm 左右，这与肖俊夫等^[20]依据田间试验数据计算出的郑州北部新乡地区冬小麦全生育期经济灌水量基本一致，因此本次研究新郑市冬小麦农田潜在腾发量 ET_c 取值设为 425 mm ^[28]。

依据新郑市多年旬平均气象资料，计算得冬小麦苗期（10 月 1 日—11 月 15 日）、越冬（11 月 16 日—1 月 30 日）、拔节（2 月 1 日—3 月 31 日）、抽穗（4 月 1 日—4 月 30 日）、灌浆—成熟（5 月 1 日—6 月 30 日）不同生育期作物需水量占全生育期需水量的比例分别为 16.0% 、 9.5% 、 22.3% 、 27.8% 、 24.5% ，这一结果与史源等^[1,21]研究得出的华北地区冬小麦各生育期的耗水比例基本一致，据此比例可计算得冬小麦不同生育期的需水量分别依次为 68.0 、 40.2 、 94.6 、 118.0 和 104.2 mm 。

2.2 天然供水

2.2.1 冬小麦播种时土壤底墒量

土壤田间持水量、凋萎系数是估算土壤最大底墒量的重要指标。结合冬小麦根系分布特点，以 $0\sim100 \text{ cm}$ 土层内的土壤最大有效持水量作为计算土壤最大底墒量的有效深度，则其计算公式为

$$W_{mnp} = 1\,000 \times (r_s - r_w) \quad (1)$$

式中 W_{mnp} 为土壤最大底墒量， mm ； r_s 为土壤田间持水量（体积含水率）， $\%$ ； r_w 为凋萎系数， $\%$ 。

土壤实际可形成的底墒量还取决于区内降雨量、蒸发量的大小以及灌水量的多少。由于新郑市 7—9 月的降水量占全年降水量的 54.8% ，期间降雨量大于蒸发量，除极端干旱外夏玉米不需要灌溉，因此，冬小麦播种时土壤底墒量可不考虑灌溉因素；区内土壤质地较疏松、渗透性较好，且耕地修筑有田埂，除极端强降雨外，降雨量可视为有效降雨量。因此，土壤实际可形成的底墒量计算公式为

$$W_{np} = P_n - ET_a \quad (2)$$

式中 W_{np} 为冬小麦播种时土壤形成的底墒量， mm ； P_n 为冬小麦播种前期 7—9 月有效降水量， mm ； ET_a 为夏玉米 7—9 月实际腾发量， mm 。当 $W_{np} > W_{mnp}$ 时，实际底墒量取 W_{mnp} 值。

土壤质地是影响土壤持水性、土壤最大底墒量的关键因素。依据前人对不同质地土壤持水性研究结果和本次实测结果，利用公式（1）估算得砂土、砂壤土、壤土可形成的最大底墒量如表 2 所示。由表 2 可以看出，不同学者测试估算的土壤最大底墒量虽然存在差异，但是不同质地土壤的最大底墒量差异显著，取本次实测范围的中间值，可估算得黄泛平原灌溉区、山前平原灌溉区、山丘缓坡灌溉区的土壤最大底墒量分别为 110.5 、 145.5 、 164.0 mm 左右。依据新郑市 1956—2015 年气象数据统计分析得，新郑市丰水年（25%降水保证率）、平水年（50%降水保证率）、干旱年（75%降水保证率）7—9 月降雨量分别为 396.6 、 336.8 、 260.2 mm ，多年平均蒸发量为 271.5 mm （蒸发量年际变化小），可以看出，新郑市丰水年、平水年 7—9 月降雨量均大于蒸发量。利用公式（2）可估算得丰水年黄泛平原灌溉区、山前平原灌溉区、山丘缓坡灌溉区冬小麦播种时的土壤墒量分别约为 110.5 、 125.1 、 125.1 mm ；而平水年和干旱年不同灌区的土壤底墒量均相同，分别为 65.3 、 0 mm 。

表 2 不同质地土壤持水性参数值

Table 2 Moisture capacity parameter value of different soil texture types

土壤质地 Soil texture	数据来源 Sources of data	田间持水量 Field moisture capacity/%	凋萎系数 Wilting coefficient/%	最大底墒量 Maximum soil moisture before sowing/mm
砂土 Sandy soil	陈晓燕等 ^[6]	12~20	6.2	58~138
	王振龙等 ^[7]	12~20	6~8	60~120
	李应林 ^[8]	13.2	6.2	72
	贾芳 ^[9]	21.3~25.0	6.2~7.8	151~172
	本次实测	13.8~22.0	6.2~7.5	76~145
砂壤土 Sandy loam soil	陈晓燕等 ^[6]	17~30	7.5	95~225
	王振龙等 ^[7]	17~30	8~12	90~180
	李应林 ^[8]	18.5	10.0	85
	贾芳 ^[9]	26.4~31.2	5.9~9.7	205~215
	本次实测	21.0~29.2	7.5~13.6	135~156
壤土 Loam soil	陈晓燕等 ^[6]	24~35	11.2	128~238
	王振龙等 ^[7]	24~35	12~18	120~170
	李应林 ^[8]	21.7	11.2	105
	贾芳 ^[9]	30.4~35.5	7.0~13.3	224~234
	本次实测	25.2~34.0	11.2~15.2	140~188

注：田间持水量、凋萎系数均为体积含水率。

Note: Field moisture capacity and wilting coefficient are all water percent of volume.

2.2.2 冬小麦全生育期大气有效降水量

冬小麦全生育期降雨强度小，降水量均可视为有效降水量。依据新郑市 1956—2015 年气象数据，统计得新郑市丰水年（25%降水保证率）、平水年（50%降水保证率）、干旱年（75%降水保证率）冬小麦全生育期降雨量分别为 254.6、216.3、163.8 mm。

2.3 灌溉需水量

由于新郑市冬春季节降水量小，强度也不大，故可不考虑径流和渗漏量，则冬小麦灌溉需水量的计算式可以简化为

$$W = ETm - W_{np} - P \quad (3)$$

式中 W 为冬小麦全生育期灌溉需水量，mm； ETm 为冬小麦全生育期需水量，mm； W_{np} 为冬小麦底墒量，mm； P 为冬小麦全生育期降水量，mm。

新郑市冬小麦全生育期作物需水量为 425 mm 左右^[28]，利用式（3）计算得新郑市各个灌溉区不同气候年型的灌溉需水量如表 3 所示。由表 3 可知，丰水年各灌区的可利用水资源量大于灌溉需水量，除丰水年外各灌溉区的可利用水资源量均小于冬小麦作物灌溉需水量。

表 3 新郑市不同农田灌溉区冬小麦作物灌溉需水量

Table 3 Irrigation water requirement of winter wheat in different irrigation areas in Xinzheng City

农田灌溉分区 Farmland irrigation areas	频率年 Frequency of years	土壤底墒 Soil water content /mm	大气降水量 Atmospheric precipitation /mm	灌溉需 水量 Irrigation water requirement /mm	可利用水 资源量 Available water resource /mm
黄泛平原灌溉区 Yellow River flood plain irrigation area	25%丰水年	110.5	254.6	59.9	122.2
	50%平水年	65.3	216.3	143.4	122.2
	75%干旱年	0	163.8	261.2	122.2
山前平原灌溉区 Piedmont plain irrigation area	25%丰水年	125.1	254.6	45.3	71.4
	50%平水年	65.3	216.3	143.4	71.4
	75%干旱年	0	163.8	261.2	71.4
山丘缓坡灌溉区 Hillside gentle slope irrigation area	25%丰水年	125.1	254.6	45.3	62.8
	50%平水年	65.3	216.3	143.4	62.8
	75%干旱年	0	163.8	261.2	62.8

3 水资源约束条件下的灌水定额优化分配

现有研究表明，作物产量不仅与全生育期的供水量有关，更取决于供水量在全生育期内的分配^[20-24]。依据作物水分生产函数，将有限的水资源优化分配至作物生长的关键期，是制定非充分灌溉制度，提高水分利用效率、节水增产的有效途径。

3.1 作物水分生产函数模型的选取

作物水分生产函数是描述作物产量与作物腾发耗水量之间关系的数学函数，作物生育阶段水分生产函数模型又可分为连加模型和连乘模型 2 种。连乘模型不仅体现了作物各生育阶段缺水对作物生长造成不利影响程度的大小，而且表达了作物阶段缺水的“滞后作用”对产量的影响，体现了早期阶段影响导致死亡的这一作物生理过程^[17]；而连加模型在实际应用中，当早期阶段导致作物死亡时，却仍能算出产量，不符合实际情况，因此，连乘模型对产量目标的反应比连加模型更敏感，更符合

实际。张志宇等^[21]研究表明 Jensen 乘法模型的拟合精度最高，Jensen 模型的表达式为

$$\frac{Ya}{Ym} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ETa_i}{ETm_i} \right)^{\lambda_i} \quad (4)$$

式中 n 为作物生育阶段数； i 为作物生育期阶段的编号； λ_i 为第 i 生育阶段的敏感指数； ETa_i 为第 i 生育阶段的实际腾发量，mm； ETm_i 为第 i 生育阶段的潜在腾发量（与 Ym 对应的腾发量），mm； Ya 为作物实际产量，kg； Ym 为作物最高产量（充分灌溉），kg。

3.2 灌水定额优化求解方法步骤

冬小麦的全生育期可划分为苗期、越冬、拔节、抽穗、灌浆-成熟 5 个生育阶段，分别用 1、2、3、4、5 表示，在某一地区冬小麦的 ETm_i 、 λ_i 均可视为固定的常数。因此，冬小麦灌溉水资源在作物不同生育阶段的最优化分配，是在灌水总量一定的条件下，以产量最大为目标优化求解 ETa_i 的过程，即对公式（4）求解 ETa_i 使 Ya/Ym 最大化的过程。在求解出 ETa_i 后，即可确定冬小麦不同生育阶段的灌水定额 W_i ，计算式如下：

$$W_i = ETa_i - W_{npi} - P_i \quad (5)$$

式中 W_i 为冬小麦第 i 生育阶段灌水定额，mm； W_{npi} 为冬小麦第 i 生育阶段的底墒量，mm； P_i 为冬小麦第 i 生育阶段的降水量，mm。

由于在确定的地区，一定气候年型的 W_{npi} 和 P_i 均为常数，因此，求解出 ETa_i 后即可得到冬小麦不同生育阶段的灌水定额 W_i 。 ETa_i 的求解方法步骤如下：

1) 为了求解方便，将式（4）表达为

$$F = \left(\frac{ETa_1}{ETm_1} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{ETa_2}{ETm_2} \right)^{\lambda_2} \left(\frac{ETa_3}{ETm_3} \right)^{\lambda_3} \left(\frac{ETa_4}{ETm_4} \right)^{\lambda_4} \left(\frac{ETa_5}{ETm_5} \right)^{\lambda_5} \quad (6)$$

2) 根据公式（4），求解 Ya/Ym 的最大值也就是求解 F 的最大值，公式（6）可转化为

$$F = \frac{(ETa_1)^{\lambda_1} (ETa_2)^{\lambda_2} (ETa_3)^{\lambda_3} (ETa_4)^{\lambda_4} (ETa_5)^{\lambda_5}}{(ETm_1)^{\lambda_1} (ETm_2)^{\lambda_2} (ETm_3)^{\lambda_3} (ETm_4)^{\lambda_4} (ETm_5)^{\lambda_5}} \quad (7)$$

3) 由于在一定地区、一定气候年型的 ETm_i 、 $\Sigma(ETa_i)$ 为常数， λ_i 也为常数，因此可设：

$$\frac{1}{(ETm_1)^{\lambda_1} (ETm_2)^{\lambda_2} (ETm_3)^{\lambda_3} (ETm_4)^{\lambda_4} (ETm_5)^{\lambda_5}} = a \quad (8)$$

$$ETa_i = x_i \cdot Q \quad (9)$$

式中 a 为常数； $Q = \Sigma(ETa_i)$ ，为常数； x_i 为 ETa_i 占 Q 的比例系数， $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 1$ 。

4) 将式（8）、式（9）代入式（7），则式（7）可表示为

$$F = a \cdot Q^{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} x_3^{\lambda_3} x_4^{\lambda_4} x_5^{\lambda_5} \quad (10)$$

5) 由于 a 、 Q 、 λ_i 均为常数，因此式（11）又可表示为

$$F = A \cdot x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} x_3^{\lambda_3} x_4^{\lambda_4} x_5^{\lambda_5} \quad (11)$$

式中 A 、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 均为常数。

6) 对公式（11）求偏微分，并令其等于 0，则可得到：

$$A \cdot \lambda_1 \cdot x_1^{\lambda_1 - 1} x_2^{\lambda_2} x_3^{\lambda_3} x_4^{\lambda_4} x_5^{\lambda_5} = 0 \quad (12)$$

$$A \cdot \lambda_2 \cdot x_2^{\lambda_2-1} x_1^{\lambda_1} x_3^{\lambda_3} x_4^{\lambda_4} x_5^{\lambda_5} = 0 \tag{13}$$

$$A \cdot \lambda_3 \cdot x_3^{\lambda_3-1} x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} x_4^{\lambda_4} x_5^{\lambda_5} = 0 \tag{14}$$

$$A \cdot \lambda_4 \cdot x_4^{\lambda_4-1} x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} x_3^{\lambda_3} x_5^{\lambda_5} = 0 \tag{15}$$

$$A \cdot \lambda_5 \cdot x_5^{\lambda_5-1} x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} x_3^{\lambda_3} x_4^{\lambda_4} = 0 \tag{16}$$

7) 令式 (12) 分别与式 (13)、式 (14)、式 (15)、式 (16) 相等, 整理后得:

$$x_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} x_1, \quad x_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} x_1, \quad x_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_1} x_1, \quad x_5 = \frac{\lambda_5}{\lambda_1} x_1$$

8) 由于 $x_1+x_2+x_3+x_4+x_5=1$, 因此得:

$$\begin{cases} x_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} x_1 + \frac{\lambda_3}{\lambda_1} x_1 + \frac{\lambda_4}{\lambda_1} x_1 + \frac{\lambda_5}{\lambda_1} x_1 = 1 \\ x_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} \end{cases} \tag{17}$$

同理可得:

$$x_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} \tag{18}$$

将公式 (18) 代入公式 (9) 可得:

$$ETa_i = \frac{\lambda_i Q}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} = \frac{\lambda_i (W_{np} + P + W)}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} \tag{19}$$

将 ETa_i 代入公式 (5) 即可计算出冬小麦不同生育阶段优化分配的灌水定额 W_i 。当 $ETa_i/ETm_i \geq 1$, ETa_i 取 ETm_i 值, 计算的灌溉需水量为负值, 表明不需要灌溉, 且部分天然水转化为下阶段底墒量。

3.3 非充分灌溉制度的制定

3.3.1 敏感指数 λ_i 的确定

非充分灌溉制度是指在农田灌溉水资源量有限的条件下, 在农作物全生育期期内科学合理地分配有限的水量, 将有限的水资源用于作物关键需水阶段, 以获取最佳的产量目标。合理确定作物不同生育阶段的作物水分敏感指数是科学制定非充分灌溉的关键。中国自 20 世纪 80 年代开始在非充分灌溉方面进行了大量的试验研究, 汪志农等^[19-21]依据田间试验数据, 采用 Jensen 模型分别在郑州、新乡、河北省中部 (望都县) 建立了冬小麦分生育期耗水量与产量的关系模型, 计算出了冬小麦不同生育阶段的水分敏感指数 (表 4)。由表 4 可看出, 不同

的研究者在不同地区计算出的冬小麦不同生育阶段的敏感指数变化规律是相同的, 敏感期由大到小的序次为抽穗、拔节、灌浆、苗期、越冬, 在抽穗-灌浆期对缺水最为敏感, 拔节期次之, 然后是苗期, 而越冬期的敏感性最小, 反映了同一作物水分生产函数具有相同的内在规律性。现有研究成果为非充分灌溉制度的制定奠定了理论基础、提供了基础依据。由于同一作物的生长发育过程具有类似的特点和习性, 且收集的田间试验数据位于华北平原区, 与研究区处于相同或相近气候区, 因此, 可利用已有研究成果作为研究区冬小麦的水分生产函数参数, 考虑到敏感性指数均为经验数据, 取已有敏感性指数的平均值较为适宜 (表 4)。由公式 (19) 可看出, 灌水定额的优化分配结果取决于作物不同生育阶段敏感性指数的相对大小, 敏感性指数的绝对值对分配结果影响不大。

表 4 冬小麦不同生育期作物水分敏感性指数
Table 4 Water sensitivity index of winter wheat in different growth stages

数据来源 Data sources	区域 Region	苗期 Seedling stage	越冬期 Over-wintering stage	拔节期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
[19]	郑州	0.150 0	0.011 0	0.173 0	0.242 0	0.174 0
[19]	新乡	0.114 0	0.081 0	0.147 0	0.164 0	0.128 0
[20]	新乡	0.058 8	0.014 8	0.146 9	0.328 6	0.104 2
[21]	河北	0.120 8	0.046 5	0.191 2	0.247 3	0.170 4
平均值 Average value		0.110 9	0.038 3	0.164 5	0.245 5	0.144 2

3.3.2 不同生育阶段实际腾发量 ETa_i 的确定

不同灌溉区不同气候年型作物供水量是不同的。当冬小麦全生育期供水量大于全生育期作物需水量 425 mm 时, 不同生育阶段实际腾发量 ETa_i 按最大腾发量 (需水量) ETm_i 确定, 即苗期、越冬、拔节、抽穗、灌浆-成熟各生育期供水量分别为 68.0、40.2、94.6、118.0 和 104.2 mm; 当全生育期供水量小于全生育期作物需水量时, 按照公式 (19) 和表 4 中 λ_i 的均值计算得, 不同生育阶段的实际腾发量 ETa_i 占供水总量的比例依次为 15.8%、5.4%、23.4%、34.9%、20.5%。在分配过程中若出现 $ETa_i \geq ETm_i$ 情况时, ETa_i 取 ETm_i 值, 不同灌溉区不同气候年型冬小麦生育期的实际腾发量优化分配结果如表 5 所示。

表 5 新郑市冬小麦全生育期供水总量及在不同生育阶段的优化腾发量
Table 5 Total supplied water in full growth stage and the distributing evaporation in different growth stages of winter wheat in Xinzheng City

农田灌溉分区 Farmland irrigation areas	频率年 Frequency of years	全生育期供水量 Supplied water summation in full growth stage	不同生育阶段优化腾发量 Distributing evaporation in different growth stages					mm
			苗期 Seedling stage	越冬期 Over-wintering stage	拔节期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	
黄泛平原灌溉区 Flood plain irrigation area	25%丰水年	487.3	68.0	40.2	94.6	118.0	104.2	
	50%平水年	403.8	68.0	25.9	94.6	118.0	97.5	
	75%干旱年	286.0	45.1	15.6	66.9	99.8	58.6	
山前平原灌溉区 Piedmont plain irrigation area	25%丰水年	451.1	68.0	40.2	94.6	118.0	104.2	
	50%平水年	353.0	56.9	19.7	84.4	118.0	74.0	
	75%干旱年	235.2	37.1	12.8	55.0	82.1	48.2	
山丘缓坡灌溉区 Hillside gentle slope irrigation area	25%丰水年	442.5	68.0	40.2	94.6	118.0	104.2	
	50%平水年	344.4	55.1	19.0	81.8	118.0	71.6	
	75%干旱年	226.6	35.9	12.4	53.3	79.5	46.7	

3.3.3 不同生育阶段天然供水量

不同灌溉区不同气候年型冬小麦播种时的土壤底墒量如表 5 所示，依据近 60 a 新郑市大气降雨量数据统计得，丰水年、平水年、干旱年冬小麦苗期、越冬、拔节、抽穗、灌浆-成熟不同生育期的大气降水量如表 6 所示。

3.3.4 冬小麦不同生育阶段灌水定额

前述立足于不同灌溉区不同气候年型冬小麦全育期供水总量，以冬小麦产量最大化为目标，通过作物水分生产函数模型求解，将冬小麦全育期供水总量优化分配到了作物的不同生育阶段，即各阶段的腾发量（表 5）。

不同的气候年型、不同灌区冬小麦播种时的土壤底墒量如表 3 所示，不同的气候年型冬小麦不同生育阶段

的大气降水量如表 6 所示。依据表 5 中确定的冬小麦不同生育阶段的腾发量，减去土壤底墒量（表 3）和大气降水量（表 6）即可求得不同灌区、不同气候年型冬小麦不同生育阶段的灌水定额，具体如表 7 所示。当 $W_i \leq 0$ 时，说明天然供水量大于实际腾发量，不需要灌溉，灌水定额取 0，腾发剩余量可转为作物下一生育阶段的土壤底墒量。由表 7 可看出，新郑市丰水年冬小麦灌溉关键期为灌浆期，灌水定额占灌溉定额的比例为 73.3%~96.7%；平水年灌溉关键期为抽穗和灌浆期，灌水定额占灌溉定额的比例分别为 60.8%~68.5%、32.2%~38.0%；干旱年苗期、拔节、抽穗、灌浆均需要灌溉，抽穗期为灌溉关键期，灌水定额占灌溉定额的比例高达 53.9%~71.9%。

表 6 新郑市冬小麦不同生育期大气降水量
Table 6 Atmospheric precipitation in different growth stages of winter wheat in Xinzheng City

频率年 Frequency of year	苗期 Seedling phase	越冬期 Over-wintering period	拔节期 Booting period	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
25%丰水年 25% high flow year	48.6	48.9	45.8	51.2	60.0
50%平水年 50% normal flow year	41.3	41.6	39.0	43.5	51.0
75%干旱年 75% dry year	31.2	31.5	29.5	32.9	38.6

表 7 新郑市不同气候年型冬小麦不同生育期灌水定额
Table 7 Irrigation quota in different growth stages of winter wheat in different climate years in Xinzheng City

农田灌溉分区 Farmland irrigation area	频率年 Frequency of year	总灌溉定额 Irrigation total quota	生育期灌水定额 Irrigation quota in different growth stages				
			苗期 Seedling stage	越冬期 Over-wintering stage	拔节期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
黄泛平原灌溉区 Yellow River flood plain irrigation area	25%丰水年	600	0	0	0	160	440
	50%平水年	1 225	0	0	15	745	465
	75%干旱年	1 225	140	0	215	660	200
山前平原灌溉区 Piedmont plain irrigation area	25%丰水年	455	0	0	0	15	440
	50%平水年	715	0	0	0	485	230
	75%干旱年	715	60	0	70	490	95
山丘缓坡灌溉区 Hillside gentle slope irrigation area	25%丰水年	455	0	0	0	15	440
	50%平水年	640	0	0	0	430	210
	75%干旱年	640	50	0	70	460	80

在设定不灌溉、均匀灌溉、非充分灌溉 3 种情景下，利用冬小麦水分生产函数（式（4））对作物相对产量进行估算，估算结果如表 8 所示。由表 8 可看出，平水年采取非充分灌溉制度估算得的冬小麦产量比不灌溉或均

匀灌溉情景下分别高 40.9%、20.6%；干旱年采取非充分灌溉制度估算得的冬小麦产量比不灌溉或均匀灌溉情景下分别高 58.9%、23.8%。

表 8 新郑市不同灌溉制度情景下冬小麦相对产量估算
Table 8 Estimated comparative yield under different scenarios of irrigation schedule in Xinzheng City

频率年 Frequency of year	灌溉制度 Irrigation schedule	$(ETa_i/ETm_i)^{\lambda_i}$					相对产量 Relative yield/%
		苗期 Seedling stage	越冬期 Over-wintering stage	拔节期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	
50%平水年 50% normal flow year	不灌溉	1.00	1.00	0.86	0.78	0.90	61.1
	均匀灌溉	1.00	1.00	0.91	0.84	0.93	71.4
	非充分灌溉	1.00	1.00	0.87	1.00	0.99	86.1
75%干旱年 75% dry year	不灌溉	0.92	0.99	0.83	0.73	0.87	47.5
	均匀灌溉	0.96	1.00	0.88	0.80	0.91	61.0
	非充分灌溉	0.96	0.99	0.90	0.96	0.92	75.5

注： ETa_i/ETm_i 为实际腾发量与潜在腾发量的比值； λ_i 为 i 生育阶段的敏感指数；相对产量为实际产量与充分灌溉条件下的潜在产量的比值。
Note: ETa_i/ETm_i is the ratio of actual and potential evaporation; λ_i is sensitive index in growth stage i ; Relative yield is the ratio of actual and potential yield in sufficient irrigation.

4 讨论与结论

4.1 讨论

目前国内对作物水分生产函数的研究, 积累了大量的冬小麦不同生育期敏感指数等试验数据, 但是并未反向求解出冬小麦不同生育期的优化供水量, 而且优化供水量也等同于需要灌水量, 优化供水量扣除土壤底墒量、阶段降水量后才是需要的灌水量, 这一过程需要结合灌区灌水总量、土壤质地、气象要素等调查研究成果进行解算, 优化解算确定具体的灌水定额, 不通过这一优化解算过程, 在水资源不足条件下, 已有研究成果难以落实到实际灌溉工作中。

新郑市农田灌溉可利用水资源量为 $640 \sim 1\,225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 仅为《河南省地方标准—农业用水定额》确定量的 $28.8\% \sim 55.0\%$, 但是, 在设定不灌溉、均匀灌溉、非充分灌溉 3 种情景下, 利用冬小麦水分生产函数对作物产量进行估算, 估算得平水年采取非充分灌溉制度比不灌溉、均匀灌溉可增产 $20.6\% \sim 40.9\%$, 干旱年可增产 $23.8\% \sim 58.9\%$, 因此, 在农田灌溉水源短缺的半干旱-干旱地区, 应加强非充分灌溉制度的推广力度, 不应放弃灌溉, 尤其是干旱年在冬小麦播种时, 采用简单易行的点灌, 用水量小, 但可保全苗, 增产效果显著。

目前中国许多灌区设置了灌溉实验站, 积累了大量的作物需水量、作物水分敏感指数等试验数据, 为非充分灌溉制度的制定奠定了基础, 虽然这些试验数据不一定很精确, 但是给出了一定的范围, 具有重要的使用价值, 应尽快将其推广应用于灌溉管理工作的实践中, 并在实践中不断总结完善。

4.2 结论

1) 在冬小麦全生育期供水总量不足 ($<$ 潜在腾发量) 情况下, 利用现有冬小麦水分敏感性研究成果, 采用 Jensen 模型求解法可以解算出冬小麦不同生育阶段的供水量 (实际腾发量) 优化值, 以实现小麦产量最大化, 不同生育阶段供水量的分配比例与其水分敏感指数大小呈正比。

2) 新郑市丰水年水资源可满足冬小麦充分灌溉需要, 灌溉关键期为灌浆期, 灌水定额占灌溉定额的比例为 $73.3\% \sim 96.7\%$; 平水年和干旱年水资源量小于灌溉需水量, 需要实施非充分灌溉制度, 高效节约利用水资源, 平水年灌溉关键期为抽穗和灌浆期, 灌水定额占灌溉定额的比例分别为 $60.8\% \sim 68.5\%$ 、 $32.2\% \sim 38.0\%$; 干旱年苗期、拔节、抽穗、灌浆均需要灌溉, 抽穗期为灌溉关键期, 灌水定额占灌溉定额的比例高达 $53.9\% \sim 71.9\%$ 。

3) 利用冬小麦水分生产函数估算作物相对产量可知, 与不灌溉或均匀灌溉相比, 平水年和干旱年采用非充分灌溉均增产效果显著。因此, 在农田灌溉水源短缺的地区, 应加强非充分灌溉制度的推广应用力度。

参考文献

[1] 史源. 灌水总量与灌溉技术约束下华北典型区域冬小麦灌溉制度优化研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院,

2019.

Shi Yuan. Study on the Optimized Irrigation Schedule of Winter Wheat in Typical Regions of North China under the Constraints of Irrigation Amount and Irrigation Technique[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese with English abstract)

- [2] 水利部, 国务院. 关于农田水利建设工作情况的报告[Z]. [2015-07-22], <http://www.doc88.com/p-656228842583.html/>.
- [3] 高占义, 王浩. 中国粮食安全与灌溉发展对策研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1273-1278.
- Gao Zhanyi, Wang Hao. Strategy of grain security and irrigation development in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1273-1278. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙景生, 康绍忠. 我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 1-5.
- Sun Jingsheng, Kang Shaozhong. Present situation of water resources usage and developing countermeasures of water-saving irrigation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吴普特, 冯浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 152-157.
- Wu Pute, Feng Hao. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 152-157. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈晓燕, 叶建春, 陆桂华, 等. 全国土壤田间持水量分布探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 113-119.
- Chen Xiaoyan, Ye Jianchun, Lu Guihua, et al. Study on field capacity distribution about soil of China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9): 113-119. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王振龙, 高建峰. 实用土壤墒情监测预报技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] 李应林. 我国不同地区农田水分供需状况和土壤水分状况分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2002.
- Li Yinglin. Analyses of Soil Moisture and Water Supply in Vary Area of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [9] 贾芳. 农田有效水分的试验研究与预报[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- Jia Fang. Farmland Valid Water Experimental Study and Forecast[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杜崇, 王天倚, 聂堂哲, 等. 基于 CROPWAT 模型的玉米水分盈亏及灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2020(8): 91-97.
- Du Chong, Wang Tianyi, Nie Tangzhe, et al. Water surplus deficit and irrigation schedule of maize based on CROPWAT model[J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 91-97. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张光岩, 李俊良, 徐良菊, 等. 不同灌溉模式对小麦干物

- 质积累及产量经济效益的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 31-38.
- Zhang Guangyan, Li Junliang, Xu Liangju, et al. Effects of different irrigation modes on dry matter accumulation and yield economic benefit of wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 31-38. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘涛, 杨晓光, 高继卿, 等. 吉林省梨树县不同作物产能及产能水分利用效率研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 97-104.
- Liu Tao, Yang Xiaoguang, Gao Jiqing, et al. Production capacity and its WUE of different crops in Lishu county of Jilin Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 97-104. (in Chinese with English abstract)
- [13] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 基于灌溉制度优化和种植结构调整的用水总量控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 103-109.
- Peng Zhigong, Zhang Baozhong, Liu Yu, et al. Constraint of total water consumption amount based on optimized irrigation schedule and planting structure adjustment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵叶萌, 刘晓英, 钟秀丽, 等. 基于产量响应诊断冬小麦水分亏缺适宜土层及其水分阈值[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 147-154.
- Zhao Yemeng, Liu Xiaoying, Zhong Xiuli, et al. Determination of soil depth and its water threshold for diagnosing water deficit of winter wheat based on grain yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454-1464.
- Zhang Xiyi. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454-1464. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李秀梅. 华北平原冬小麦-夏玉米变量灌溉水分管理方法[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- Li Xiumei. Variable Rate Irrigation Management Method for Winter Wheat and Summer Maize in the North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [17] 罗遵兰. 华北地区冬小麦与夏玉米水分生产函数模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- Luo Zunlan. Crop Water Production Function of Winter Wheat and Summer Corn in the North of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [18] 冯峰, 董国涛, 张文鸽. 黄河流域典型区域目标 ET 计算及水资源调配方案评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 101-111.
- Feng Feng, Dong Guotao, Zhang Wenge. Calculation of area target evapotranspiration in yellow river basin and evaluation of water resource allocation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(23): 101-111. (in Chinese with English abstract)
- [19] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 新乡地区冬小麦耗水量与产量关系研究[J]. 河南农业科学, 2009(1): 55-59.
- Xiao Junfu, Liu Zhandong, Duan Aiwan, et al. Studies on water production function of winter wheat in Xinxiang district[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2009(1): 55-59. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张志宇, 郝志红, 吴鑫淼. 冬小麦-夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 102-111.
- Zhang Zhiyu, Qie Zhihong, Wu Xinmiao. Multi-objective optimization model of irrigation schedule for winter wheat-summer maize rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 102-111. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 121-129.
- Zhou Shiwei, Hu Xiaotao, Wang Wen'e, et al. Optimization of irrigation schedule based on RZWQM model for spring wheat in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 121-129. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邵颖, 李强, 曹晓华, 等. 泾惠渠灌区冬小麦合理灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2017(11): 16-20.
- Shao Ying, Li Qiang, Cao Xiaohua, et al. Experimental research on reasonable irrigation schedule of winter wheat in Jinghuiqu irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2017(11): 16-20. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邵光成, 王志宇, 王小军, 等. 基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 289-297.
- Shao Guangcheng, Wang Zhiyu, Wang Xiaojun, et al. Optimal irrigation schedule based on DSSAT model for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 289-297. (in Chinese with English abstract)
- [25] 河南省水利厅. 河南省地方标准—农业用水定额 (DB41/T958—2014)[S]. 郑州: 黄河水利出版社, 2015.
- [26] 李剑锋, 周丹, 李红莉, 等. 河南省新郑市耕地地力评价[M]. 郑州: 中原农民出版社, 2010.
- [27] 高维征, 潘恺, 李聪伟, 等. 新郑市 1:10 万水文地质调查报告[R]. 郑州: 河南有色岩土工程公司, 2013.
- [28] 马志红, 许蓬蓬, 朱自玺, 等. 河南省冬小麦灌溉需水量及年型特征[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(4): 60-64.
- Ma Zhihong, Xu Pengpeng, Zhu Zixi, et al. Irrigation water requirement for winter wheat and its year pattern characteristics in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(4): 60-64. (in Chinese with English abstract)
- [29] 朱自玺, 安顺清, 吴乃元. 作物水分胁迫和干旱研究[M]. 郑州: 河南科技出版社, 1991.
- [30] 陈玉民, 郭国双, 王广兴. 中国主要作物需水量与灌溉量[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

Water-saving irrigation regime for winter wheat in county areas under water resources constraints

Zhu Jiawei, Zhao Congjia, Guo Ruirui, Zhou Linlin

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: High-efficiency water-saving irrigation engineering technology is facing a difficult situation to be extended popularly covering the field crops. A feasible way can be to optimize the water-saving irrigation regime, thereby to improve the efficiency of irrigation water. In this study, an optimization design was conducted to develop a water-saving irrigation regime in Xinzheng City, Henan Province, China. Three scenarios were set, including non-irrigation, average irrigation, and insufficient irrigation. The specific procedures were: First, Penman-Monteith formula was used to calculate indirectly the water volumes that the winter wheat required in the full and every growth stages. Second, the collected parameters were selected, such as meteorological data, the field moisture capacity, wilting coefficient of different types of soil texture, and hydro-geological data, thereby to estimate the total water resource that supplied in the full growth stage of winter wheat, including atmospheric precipitation, soil water content, and available water resource for irrigation. Third, the water sensitivity index of winter wheat was used to monitor the water demand of winter wheat in the different growth stages. Taking the maximum yield of winter wheat as a goal, a Jensen-model was selected to optimize the total supply water, and further distribute to the different growth stages of winter wheat. Finally, the obtained parameters were used, including the actual evapotranspiration, atmospheric precipitation, and soil water content, to calculate the irrigation water quota in different growth stages of winter wheat. The results showed that: 1) The total supply water was less than that in normal and dry years in Xinzheng City, Henan Province, China. Therefore, it was necessary to implement deficit irrigation regime. 2) Since the Jensen-model cannot be used to calculate directly the irrigating quota in different growth stages, the actual evaporation can be achieved for the weight coefficient of sensitivity index in different growth stages of winter wheat. Specifically, the allocation proportions of evaporations were 15.8%, 5.4%, 23.4%, 34.9%, 20.5% in seedling, over-wintering, booting, heading, and filling stages. 3) In Xinzheng City, the key irrigation periods of winter wheat were the heading and filling stages. In filling stages, the irrigating quota accounted for 73.3%-96.7% of the total irrigation amount in high flow years. In heading and filling stages, the irrigating quota accounted for 60.8%-68.5% and 32.2%-38.0% in normal flow years. In heading stages, the irrigating quota accounted for 53.9%-71.9% in dry years. In Jensen-model estimation, the yield of winter wheat under insufficient irrigation was 20.6%-40.9% higher than that under non-irrigation or average irrigation in normal flow year, and 23.8%-58.9% higher in dry year. Therefore, the amount of water resources available for irrigation in Xinzheng City was only 640-1225 m³/hm², 28.8%-55.0% of the quota given in Henan Province local standard-agricultural water. Nevertheless, the insufficient irrigation can be recommended for the field crops. The finding can offer the basic counties (cities) data for extending a deficit irrigation regime to other counties.

Keywords: irrigation; crops; water-saving; deficit irrigation; irrigation schedule; Henan Province