

盘锦市稻田水分生产率及水分生产函数研究

张旭东, 迟道才, 夏桂敏, 孙仕军

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要:为寻找提高灌溉水分生产率的途径和突破口,采用统计资料、卫星遥感数据和地面气象数据相结合的方法,计算了2005—2013年间盘锦市稻田面积上水稻生育期内的有效降水量、蒸发蒸腾量、各年稻田的总灌溉耗水量,以及稻田蒸发蒸腾水分生产率和灌溉水分生产率,并建立以地级市为单元水稻水分生产函数。结果表明,近9年来盘锦稻田蒸发蒸腾和灌溉水分生产率年平均值分别为2.718、1.170 kg/m³;水稻生育期内的年平均蒸发蒸腾量为341.2 mm,年有效降水量为139.3 mm,年平均灌溉耗水量为720.4 mm,有效降水对蒸发蒸腾量的贡献率为40.8%,灌溉对蒸发蒸腾量的贡献率为59.2%;修正的Jensen模型适合于盘锦市多年间稻田面积上“作物-水分”关系表达,统计值和模拟值线性关系显著,7月份敏感指数最小,9月份敏感指数最大。本研究旨在为区域稻田蒸发蒸腾量不同水分来源的构成分析及Jensen模型在区域中的应用提供思路和借鉴。

关键词:水分生产率;水分生产函数;灌溉耗水量;盘锦

中图分类号:S127

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2017)07-0758-06

A study on the rice paddy water productivity and water production function in Panjin

ZHANG Xudong, CHI Daocai, XIA Guimin, SUN Shijun

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to find a new way to raise the water productivity, the effective precipitation, evapotranspiration (E_T) of rice growth season and irrigation water (I) in each year were calculated from 2005 to 2013 for rice field in Panjin based on the statistical data, satellite remote data and ground meteorological data. The water productivity base on E_T and I were also calculated respectively. Meanwhile, rice water production function was developed based on a unit of Panjin. The results showed that these two different water productivity averages were 2.718 and 1.170 kg/m³, respectively. The average evapotranspiration of rice field for each growth season was 341.2 mm and the corresponding effective precipitation was 139.3 mm. The average annual of consumption irrigation water was 720.4 mm and the effective precipitation's contribution to E_T was 40.8%. The irrigation's contribution to the E_T was 59.2%. Jensen model was suitable for Panjin years "crop - water" relationship expression of the paddy field area. Statistics and simulation values can be described by a linear relationship. The sensitive index was the highest in July and the smallest in September. The study provided a unique approach for the analysis of different water sources in E_T of regional paddy field and an example of Jensen model application in the regional area.

Keywords: water productivity; water production function; irrigation water consumption; Panjin

水分生产率(water productivity, W_p)指单位水资源量在一定的作物品种和耕作栽培条件下所获得的产量或产值,它是衡量农业生产水平和农业用水科学性与合理性的综合指标,也是评估节水灌溉与高效农业发展水平的重要指标^[1]。作物水分生产函数(water production function)是从投入产出观点研究水分供应时间、数量对作物产量影响的数学模拟描述^[2-3]。这两者都反映作物和水分之间的关系,影响它们的因素有作物品种、气候类型、灌溉技术、田间水分管理和肥料使用、机械投入等。由于关乎水资源和粮食安全,水分生产率和水分生产函数长久以来都是研究的热点问题^[4]。水稻作为世界上大宗粮食作物,对其生产过程中的水分消耗和水分生产率的评估显得非常重要。崔远来等^[5-6]分析了漳河

灌区水稻灌溉用水量及田间尺度、中等尺度、干渠尺度和灌区尺度等不同尺度的水分生产率,引起人们对水分生产率尺度效应的关注。张旭东^[7]采用统计数据和遥感数据相结合的方法,进行了东北三省水稻水分生产率空间分布研究,得出了东北地区水稻水分生产效率高值区域分布在北纬44°~46°之间的结论。Cai等^[8]基于遥感、统计与气象数据对印度恒河流域水稻产量、耗水量与水分生产率进行了研究。付强等^[9]通过试验对三江平原井灌区水稻的水分生产函数及敏感指数的变化规律进行了研究。迟道才等^[10]以沈阳农业大学试验站数据为基础,建立了北方水稻的动态水分生产函数。陈伟^[11]在辽宁省灌溉试验中心站进行了水稻水分生产函数和水氮耦合模型的试验研究。这些研究均为水稻耗水机制的评估

收稿日期:2016-08-24

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20112103110007);辽宁省教育厅一般项目(L2014268)

第一作者:张旭东(1979-),男,讲师,主要研究方向为灌溉排水及农业节水

通信作者:迟道才,教授,主要研究方向为灌溉排水及农业节水,daocaichi@vip.sina.com

和水分生产函数的建立及应用积累了经验。

盘锦市是北方滨海水稻种植区的典型代表,水稻种植比例大、单产高,是辽宁省的重要水稻产区,但有关该地区水稻水分生产率及水分生产函数年际变化的研究鲜有报道。农业生产中,水稻种植用水主要来源于天然降水和人工灌溉,水稻水分消耗的主要途径为蒸发蒸腾(evapotranspiration, E_T),稻田的田间渗漏则认为补给了地下水,并不是有效的消耗。为明确有效降水(effective precipitation, P_e)和灌溉水(irrigation water consumption, I)在水稻水分消耗过程中的作用和贡献,本文计算了盘锦市2005—2013年连续9年的蒸发蒸腾水分生产率、灌溉水分生产率,探讨它们的变化规律,同时分析蒸发蒸腾量、有效降水量、灌溉量的年际变化及特征,旨在为灌溉水分生产率的提高寻求新的突破口。

1 数据来源及预处理

1.1 稻田面积分布

盘锦市位于渤海湾辽河入海口,面积为4 063 km²,在辽宁省14个地级市中面积最小,但水稻种植面积比例却最高。该地区土壤含盐量大,从20世纪60年代起,当地政府和群众协同水利专家和农业科学家不断努力,采用淡灌咸排的洗盐、压盐措施,将盐分控制在合理的范围内,种稻改良盐碱地,现在盘锦市已经具备了较为完备的灌溉排水体系,水稻种植面积比为全省最大,也是全国水稻种植比例最高的地级市。

盘锦市的水稻种植分布在东部辽河、大辽河、饶阳河、大凌河之间或两岸的平坦地带,主要位于盘山县和大洼区,盘锦市地理位置及水稻种植分布见图1。本研究采用的2005—2013年水稻播种面积数据来自2006—2014年《辽宁统计年鉴》。9年中播种面积最大的年份是2010年,为 1.09×10^5 hm²,最小播种面积为 1.025×10^5 hm²,平均播种面积为 1.069×10^5 hm²,年间波动微小。实际生产中,一家一户的生产模式,导致某些地块个别年份会“水改旱”或“旱改水”,而卫星资料提取种植面积分布时,对此却难以区分。因此,笔者认为这9年间水稻种植分布改变不大,微小变化可忽略不计。稻田的空间分布由Landsat5陆地卫星中间年份2009年的数据采用监督分类的极大似然法提取^[7]。解译结果水稻种植面积的像元数为1 251 902个,面积为 $1.126 7 \times 10^5$ hm²,与2009年盘锦市水稻实际种植面积 1.085×10^5 hm²相比,相对误差为3.84%。

1.2 稻田面积上的蒸发蒸腾量

稻田面积上的蒸发蒸腾量采用Mu等^[12]改进后第5版的MOD16数据,该数据空间分辨率为1 000 m×1 000 m,时间分辨率可分为8 d、月和年这3种,用于全球或区域水量平衡计算。用1.1得到的水稻

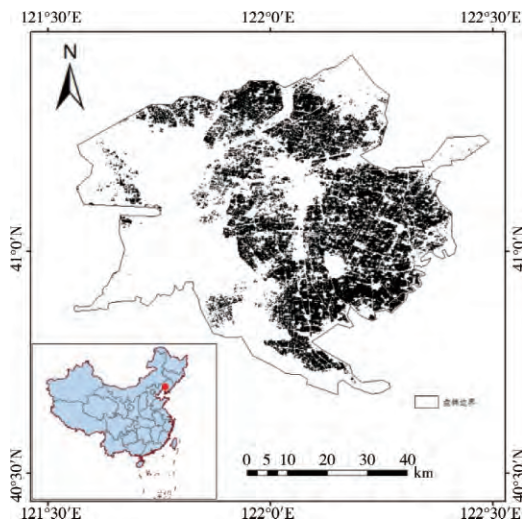


图1 盘锦市地理位置及水稻种植分布图

种植分布图制作掩膜,从MOD16上剔除与水稻无关的像素,将剩下的水稻面积所有像素的蒸发蒸腾量的平均值作为盘锦稻田面积上的蒸发蒸腾量,共提取了2005—2013年108个月的蒸发蒸腾量。

1.3 稻田面积降水和有效降水

稻田面积降水采用中国气象数据网(data.cma.cn)发布的1961年1月至2013年12月“中国地面降水月值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集(V2.0)”,该数据集基于中国地面2 472台站降水资料,利用ANUSPLIN软件进行空间插值生成,数据经过交叉验证和误差分析。水稻种植面积涉及到东经 $121.5^\circ \sim 122.5^\circ$ 、北纬 $40.5^\circ \sim 41.5^\circ$ 的4个像元。稻田面积降水的计算以这4个像元的降水数据为基础,乘以各像元相应稻田面积占全市总稻田面积比例的权重,具体计算为

$$P_a = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i, \quad (1)$$

其中, $\alpha_i = A_i/A$ 。 (2)

式中: P_a 为稻田面积降水量,mm; P_i 为第*i*个像元的降水量,mm; α_i 为稻田面积权重,由式(2)计算; A_i 为第*i*个像元中的稻田面积,m²;A为盘锦市总稻田面积,m²。为了验证该方法的可行性,将式(1)计算的稻田面积降水量同盘锦市大洼气象站的实测数据进行比较,发现两者的相关系数为0.97,证明此方法可行。

有效降水量即总降水量减去径流量、蒸发量和深层渗漏量后,保留在根区、能被作物利用的水量。本文的有效降水量计算采用美国农业部土壤保持局推荐的方法,该方法已被多位学者^[13-14]证明并采用,具体计算为

$$\begin{cases} P_{ed} = P_{ad}(4.17 - 0.2P_{ad})/4.17, & P_{ad} < 8.3 \text{ mm/d} \\ P_{ed} = 4.17 + 0.1P_{ad}, & P_{ad} \geq 8.3 \text{ mm/d} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ed} 为日有效降水量, mm/d; P_{ad} 为日总降水量, mm/d。大洼站的日有效降水量由式(3)用 2005—2013 年的日降水资料计算, 然后根据大洼站月降水和月有效降水的比例关系, 将式(1)计算所得的盘锦市稻田面积降水量转化为稻田面积有效降水量。

1.4 稻田面积灌溉水量

灌溉水量数据来自《盘锦市水资源公报》(2005—2013 年), 可分为灌溉用水量和灌溉耗水量。用水量指分配给用户的包括输水损失在内的毛用水量; 耗水量指在输水、用水过程中消耗掉而不能回归到地表水体或地下含水层的水量; 本研究采用灌溉耗水量数据。由于盘锦市紧邻渤海, 土壤的盐碱度较高, 在灌溉过程中涉及洗盐的问题, 相比其他地区, 其灌溉定额一直较高^[15], 同时诸多河流经盘锦汇入渤海, 灌溉耗水量中会有一部分排入渤海。《盘锦市水资源公报》的农田灌溉耗水量是指盘锦市的全部作物包括粮食作物、经济作物和蔬菜的灌溉耗水量。考虑到研究时段的 9 年内, 水稻和蔬菜是耗水大户, 水稻的种植面积占农作物总播种面积的比例最大, 为 74.9%, 蔬菜种植面积占农作物总播种面积的 10.5%, 其他作物灌溉用水较少, 且年际之间波动不大, 根据《辽宁省行业用水定额》(DB21/T 1237—2015)中作物灌溉定额和已知的种植面积比例之间的关系, 确定 95% 的农田灌溉耗水量为稻田消耗的灌溉水量。

2 结果与分析

2.1 稻田月蒸发蒸腾量和有效降水量特征分析

盘锦的水稻为 1 年 1 熟, 一般在 5 月底 6 月初插秧, 稻田在 11 月—次年 4 月 6 个月份中没有作物, 但是土壤的蒸发依然存在, 这部分损耗的水量也是在水稻生产的过程中发生的, 因此, 在分析蒸发蒸腾和有效降水规律时, 不可忽略这段时间。稻田的月蒸发蒸腾量和有效降水量特征见表 1。由表 1 可知, 9 年中蒸发蒸腾最大值一般发生在每年的 7、8 月份, 最小值一般发生在 4、5 月份。7、8 月份正值水稻需水旺季, 稻田的蒸发蒸腾量很大; 4、5 月份间稻田没有作物生长, 经过了冬季低温少雨的季节, 表层土壤含水量低, 而且随着温度回升, 土壤从冻土状态返回到解冻状态, 土壤的毛细管作用被截断, 因此, 该段时间稻田的蒸发蒸腾达到最小。有效降水的最大值一般发生在 7、8 月份, 个别年出现在 6 月份, 基本上与蒸发蒸腾的最大值同步; 但有效降水的最小值一般发生在每年的 12 月或 1 月, 比最小蒸发蒸腾发生的时间要早, 因此, 在没有作物也没有灌溉的冬季, 有效降水对土壤的蒸发影响有 1 个滞后的过程。水稻的生育期按 6—9 月统计, 生育期内蒸发蒸腾占全年平均为 71.1%, 变化范围为 68.2%~73.1%, 该比例比较稳定; 生育期内的有效降水占全年有效降水平均值为 59.3%, 与蒸发蒸腾相比, 该值年际变化较大, 从最小的 47.6% 到最大的 67.7%, 这是由降水的年际变化特征决定的。

表 1 稻田月蒸发蒸腾量和有效降水量特征

年份	蒸发蒸腾量							有效降水量						
	最大值/最小值/mm		月份		年累计值/mm	生育期		最大值/最小值/mm		月份		年累计值/mm	生育期	
	mm	mm	月份	月份		值/mm	占年累计值的比例/%	mm	mm	月份	月份		值/mm	占年累计值的比例/%
2005 年	128.9	13.1	7	4	505.1	355.1	70.3	56.2	0.0	6	3	229.7	141.9	61.8
2006 年	141.2	10.9	8	5	509.3	371.8	73.0	34.4	0.3	6	12	164.4	99.1	60.3
2007 年	136.8	10.8	8	5	501.6	350.7	69.9	46.3	1.2	7	1	181.0	97.0	53.6
2008 年	136.5	14.1	7	4	483.0	353.1	73.1	58.4	0.0	7	1	247.5	155.7	62.9
2009 年	123.9	8.3	8	5	442.6	314.3	71.0	37.5	2.3	7	2	213.6	101.6	47.6
2010 年	119.5	15.2	7	4	460.6	314.3	68.2	63.7	4.0	8	1	294.6	167.7	56.9
2011 年	127.7	8.6	8	5	445.4	325.1	73.0	62.3	0.2	8	1	228.4	154.6	67.7
2012 年	129.4	9.2	7	5	496.0	352.8	71.1	53.9	0.4	8	1	294.5	178.7	60.7
2013 年	126.7	11.3	7	5	473.6	333.8	70.5	54.3	1.9	7	12	254.3	157.7	62.0

2.2 稻田水分生产率

将单位稻田看作 1 个系统, 水分的输入项有灌溉耗水和有效降水, 水分的消耗项为蒸发蒸腾量和田间排水, 而输出项为水稻的产量。为评价稻田的生产效率, 根据文献[1]由式(4)、式(5)计算出每年稻田的蒸发蒸腾水分生产率 W_{PET} 、灌溉水分生产率 W_{PI} 。

$$W_{PET} = Y/E_T; \quad (4)$$

$$W_{PI} = Y/I. \quad (5)$$

式中: Y 为稻田单位面积水稻产量, kg/m²; E_T 为水稻全生育期内稻田单位面积上的蒸发蒸腾量, mm; I 为水稻全生育期内单位面积的灌溉耗水量, 包括洗盐、整地泡田、蒸发蒸腾及排水消耗的水量, mm。

经计算, 2006—2013 年盘锦市稻田 2 种不同的

水分生产率见图 2。

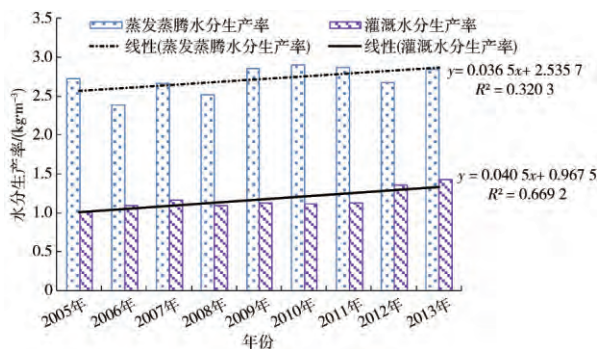


图 2 盘锦市稻田水分生产率年际变化

由图 2 可知, 稻田的蒸发蒸腾水分生产率平均为 2.718 kg/m^3 , 要明显大于灌溉水分生产率的平均值 1.170 kg/m^3 。蒸发蒸腾水分生产率 W_{PET} 变化范围为 $2.387 \sim 2.909 \text{ kg/m}^3$, 2010 年最大, 2003 年最小, 年际波动相对稳定; 灌溉水分生产率 W_{PI} 变化范围为 $1.006 \sim 1.432 \text{ kg/m}^3$, 2013 年最大, 2005 年最小, 年际波动相对剧烈。两者均随年份的增加呈增加的趋势, 但灌溉水分生产率与年份之间的相关系数 ($R(0.818) > R_{0.01}(0.798)$) 达到了 0.01 的显著水平, 而 W_{PET} 和年份之间的相关关系没有达到 0.05 的显著水平, 说明近 9 年来盘锦市的水稻灌溉管理水平逐步提高。

水分生产率与水分项之间关系见图 3, W_{PET} 和蒸发蒸腾 ($R = 0.905 > R_{0.001} = 0.898$)、 W_{PI} 和灌溉水 ($R = 0.931 > R_{0.001} = 0.898$) 之间均呈显著负相关关系。但 W_{PET} 梯度的绝对值要大于 W_{PI} , 即减少同样比例的水分项, W_{PET} 增加较快, 而 W_{PI} 增加较慢。

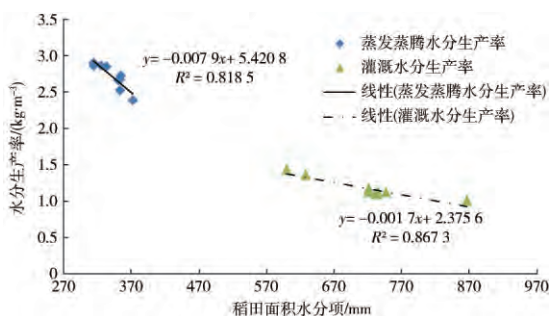


图 3 水分生产率和水分项的关系

由图 3 的横坐标可知, 蒸发蒸腾的变化区间小而窄, 为 $314.3 \sim 371.8 \text{ mm}$, 而灌溉量的变化区间大而宽, 为 $599.5 \sim 866.8 \text{ mm}$, 这是因为本研究中的灌溉量还包括了插秧前期泡田、洗盐的水量和生育期内稻田排向渤海的无效排水量。可见, 9 年中稻田生育期内蒸发蒸腾平均为 341.2 mm , 生育期内的有效降水量 P_e 平均为 139.3 mm , 年总灌溉耗水量平均为 720.4 mm 。从供给和消耗两方水量平衡的角度考虑, 供给方为有效降水和灌溉耗水, 消耗方为蒸发蒸腾和排水; 有效降水占蒸发蒸腾的 40.8% , 蒸发蒸

腾其余的 59.2% 由灌溉水提供, 也就是说灌溉水对蒸发蒸腾的年均贡献量为 201.9 mm 。因此, 在稻田水量平衡中有 518.5 mm 的灌溉水被排入大海, 占总灌溉耗水量的 74.9% 。经分析, 这部分灌溉量是在水稻生产过程中由泡田、洗盐、排水等活动进入大海不能被再次利用的水量, 它们是未来水稻节水灌溉管理水平提高的潜力所在。

2.3 稻田水分生产函数

我国比较常用的作物水分生产函数有加法模型和乘法模型, 加法模型的代表是 Blank 模型, 乘法模型的代表是由 Jensen、Hiller 等不断发展和修正的 Jensen 模型^[2], Jensen 模型的形式为

$$Y_a/Y_m = \prod (E_{T_{ai}}/E_{T_{mi}})^{\lambda_i} \quad (6)$$

式中: Y_a 和 Y_m 分别为作物受到水分胁迫时和作物水分供应充足时相应的产量, kg/hm^2 ; $E_{T_{ai}}$ 和 $E_{T_{mi}}$ 分别为作物在第 i 生长阶段受到水分胁迫时的实际蒸发蒸腾量和水分供应充足时的蒸发蒸腾量, mm ; λ_i 为第 i 生长阶段的敏感指数, λ_i 越大, 表示第 i 生长阶段对缺水越敏感, 反之, 则说明该阶段缺水对产量的影响较小。敏感指数一般应在同一气候、土壤条件下, 分别在作物不同的生育阶段设置不同水分处理进行试验而求得。本研究对该模型加以修正, 将整个研究对象看作试验小区, 将各年不同气象条件下的水稻生产看作是在不同水分条件下得到的试验结果, i 取自然月份 6 月、7 月、8 月、9 月, $E_{T_{mi}}$ 取第 i 月历史最大值, Y_m 取历史年极大值, 扩大了 Jensen 模型的应用范围, 则稻田上的水稻水分生产函数可表达为

$$Y_a/Y_m = (E_{Ta6}/E_{Tm6})^{0.1305} \cdot (E_{Ta7}/E_{Tm7})^{-0.5310} \cdot (E_{Ta8}/E_{Tm8})^{-0.0022} \cdot (E_{Ta9}/E_{Tm9})^{0.2954} \quad (7)$$

经检验, 拟合值和实测值的相关性 ($R(0.7468) > R_{0.05}(0.666)$) 达到了显著水平。将敏感指数由大到小排序, 依次是 9 月、6 月、8 月、7 月。可见, 最不敏感的是 7 月份, 此时是水稻分蘖的后期, 这与前人的研究成果类似, 即在水稻分蘖后期水分亏缺对产量最不敏感, 应适当控水晒田以控制过度分蘖; 9 月份敏感指数最大, 表明该阶段缺水对产量的影响最大, 因为该阶段为水稻的灌浆、黄熟期, 是产量形成的关键时期, 一旦受到水分胁迫, 水稻会明显减产。采用同样的方法将 Jensen 模型和 Blank 模型进行比较, 发现 Blank 模型回归结果不具有显著性, 因此 Jensen 模型更适合于盘锦水稻的分析, 7 月、8 月的水分敏感指数为负值, 可能是因为模型的数据采用不同年份的面上历史数据所致, 并不能达到试验设计中那样分阶段严格控制水分的效果。

3 结果与讨论

蒸发蒸腾水分生产率指标是从作物在产量形成过程中消耗水分的角度来评价水分的利用效率, 它

更多地反映了土壤、气候和作物等自然外在条件；而灌溉水分生产率指标是从水源供应的角度来评价人为内在的用水管理水平。两者相结合能更为全面地评价水分的利用水平。

近 9 年来, 盘锦稻田蒸发蒸腾、灌溉用水的年平均水分生产率分别为 2.718、1.170 kg/m³。稻田在水稻生育期内的平均蒸发蒸腾值为 341.2 mm, 相应的有效降水量为 139.3 mm, 稻田年平均总灌溉耗水量为 720.4 mm。在水稻生育期内, 降水不足以满足稻田蒸发蒸腾的需求, 因此, 盘锦稻田的灌溉供水管理及田间水分管理显得至关重要。对盘锦市稻田水稻生育期内蒸发蒸腾量的来源构成计算结果表明, 有效降水对蒸发蒸腾的贡献率为 40.8%, 灌溉对蒸发蒸腾的贡献率为 59.2%。该结果为理论分析所得, 需要在未来选择一定面积的稻田进行田间观测和校验, 并进一步采用作物水足迹等新的理论和方法进行分析。水稻水分生产函数 Jensen 模型适合于盘锦市多年间稻田面积“作物-水分”关系表达, 预测值和实际值的相关系数 $R(0.746\ 8) > R_{0.05}(0.666)$, 比 Blank 模型要好; 敏感指数 7 月份最小, 9 月份最大, 在灌溉管理中, 应重视 9 月份的田间水分管理。

盘锦地区作为滨海地区的代表, 是辽宁省盐碱地分布较多的地区^[16], 在灌溉管理中, 需要大量的淡水洗盐和压盐排水量^[15]。盘锦市紧邻渤海, 水稻格田规整, 灌排渠系完善, 在水稻生产中, 灌溉耗水除了蒸发蒸腾, 排水也占相当的部分, 经计算, 洗盐排水量和无效排水量占年总灌溉耗水量的 72.0%。如何对正常所需的洗盐排水量和无效排水量这 2 部分进一步区分量化, 是未来滨海地区水稻节水灌溉研究的重点和难点之一, 减少无效排水更是未来稻田节水的潜力所在。

研究中采用的蒸发蒸腾数据直接来自 MOD16 模型的计算, 由于缺乏长系列的稻田蒸发蒸腾量实测数据, 因而没有进行校验, 但从一些学者在南非^[17]和加拿大^[18]采用通量塔实测数据对其进行的校验结果来看, MOD16 在气温较低且地面植被指数较低的情况下, 存在一定的不确定性, 因此, 需要采用其他模型或方法进一步提高稻田蒸发蒸腾的估算精度。

4 结 论

本文计算了近 9 年间盘锦市水稻生育期内的有效降水量、蒸发蒸腾量、稻田的总灌溉耗水量、蒸发蒸腾水分生产率、灌溉水分生产率, 并建立了地级市的水稻水分生产函数。主要结论如下:

1) 盘锦稻田年有效降水量为 139.3 mm, 蒸发蒸腾量为 341.2 mm, 灌溉耗水量为 720.4 mm, 有效降水对蒸发蒸腾量的贡献率为 40.8%, 灌溉对蒸发蒸腾量的贡献率为 59.2%; 蒸发蒸腾和灌溉水分生产率年平均值分别为 2.718 kg/m³、1.170 kg/m³;

2) 修正的 Jensen 模型适合盘锦市多年间稻田面

积上“作物-水分”关系表达, 7 月份敏感指数最小, 9 月份敏感指数最大, 应重视 9 月份稻田的水分管理;

3) 盘锦市稻田的洗盐排水量和无效排水量占年总灌溉耗水量的 72.0%, 该部分水量是未来稻田节水的潜力所在。

[参考文献] (References)

- [1] 李远华, 赵金河, 张思菊, 等. 水分生产率计算方法及其应用[J]. 中国水利, 2001(8): 65-66.
- [2] 王进鑫, 黄宝龙, 王明春, 等. 侧柏幼树不同生长阶段对水分的敏感性与蒸腾效率[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 711-718.
WANG Jinxin, HUANG Baolong, WANG Mingchun, et al. Sensitivity of platycladus orientalis young tree to water stress and its transpiration efficiency at different growth stages during annual growth period [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 711-718. (in Chinese)
- [3] 丛振涛, 周智伟, 雷志栋. Jensen 模型水分敏感指数的新定义及其解法[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 730-735.
CONG Zhentao, ZHOU Zhiwei, LEI Zhidong. New definition and computation on the water sensitive index in Jensen model [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 730-735. (in Chinese)
- [4] TANG Xuguang, LI Hengpeng, DESAI A R, et al. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 7483.
- [5] 崔远来, 董斌, 邓莉. 漳河灌区灌溉用水量及水分生产率变化分析[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 4-8.
CUI Yuanlai, DONG Bin, DENG Li. Changes of irrigation water use and productivity in Zhanghe irrigation system [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 4-8. (in Chinese)
- [6] 崔远来, 董斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45-51.
CUI Yuanlai, DONG Bin, LI Yuanhua. Variation of water productivity in different spatial scales [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 45-51. (in Chinese)
- [7] 张旭东. 东北三省水稻水分生产率时空变化规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
ZHANG Xudong. Study on temporal and spatial variation of rice water productivity in northeast three provinces of China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [8] CAI X L, SHARMA B R. Integrating remote sensing, census and weather data for an assessment of rice yield, water consumption and water productivity in the Indo-Gangetic river basin [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 309-316.
- [9] 付强, 王立坤, 门宝辉, 等. 三江平原井灌水稻水分生产函数模型及敏感指数变化规律研究[J]. 节水灌溉, 2002(4): 1-3.
FU Qiang, WANG Likun, MEN Baohui, et al. Study

- on water production function model and variable law of sensitivity index of rice in Sanjing Plain [J]. *Water Saving Irrigation*, 2002(4): 1-3. (in Chinese)
- [10] 迟道才,王琯,夏桂敏,等. 北方水稻动态水分生产函数研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 30-34. CHI Daocai, WANG Xuan, XIA Guimin, et al. Dynamic water production functions for rice in North China [J]. *Transactions of CSAE*, 2004, 20(3): 30-34. (in Chinese)
- [11] 陈伟. 水稻水分生产函数及水氮耦合模型试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013. CHEN Wei. Experimental study on rice water production function and water-nitrogen coupling model [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [12] MU Qiaozhen, ZHAO Maosheng, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [13] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 175-183. LI Yong, YANG Xiaoguang, YE Qing, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961—2007 [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 175-183. (in Chinese)
- [14] 殷志强,秦小光,李长生. 东北三省主要农作物耗水量与缺水量研究[J]. *科技导报*, 2009, 27(13): 42-49. YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, LI Changsheng. Study on water consumption and deficiency of main crops in northeastern China [J]. *Review Science & Technology*, 2009, 27(13): 42-49 (in Chinese)
- [15] 何俊仕,柳焯,付玉娟,松辽流域相似类型区典型作物灌溉用水定额对比分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2015, 46(2): 192-197. HE Junshi, LIU Ye, FU Yujuan. Comparative analysis of typical crop irrigation water quota from similar areas in Songliao Basin [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2015, 46(2): 192-197. (in Chinese)
- [16] 宋丹,辽宁省盐碱化耕地现状及改良措施[J]. *辽宁农业科学*, 2012(5): 50-53.
- [17] RAMOELO A, MAJOZI N, MATHIEU R, et al. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7406-7423.
- [18] WANG Shusen, PAN Ming, MU Qiaozhen, et al. Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(4): 1540-1560.
-
- (上接第732页)
- [10] 冯俊. 空中交通管制员工作满意度及其影响因素的调查[D]. 武汉: 华中师范大学, 2007. FENG Jun. The investigation of air traffic controllers work satisfaction and its influencing factors [D]. Wuhan: Huazhong Normal University, 2007. (in Chinese)
- [11] 张宇. 排班管理系统的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012. ZHANG Yu. Research and implementation of scheduling management system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 伍兴华. 管制员工作负荷及班组管理分析[J]. *商品与质量*, 2012(5): 67.
- [13] 怀英杰. 浅谈管制班组人员组合和培训[J]. *中国西部科技*, 2013, 12(7): 88-89.
- [14] 祝刚,杜志良. 空中交通管制人员自动排班算法的研究与设计[J]. *中国民用航空*, 2013, 165(11): 94-95. ZHU Gang, DU Zhiliang. Research and design of automatic air traffic controllers' scheduling algorithm [J]. *China Civil Aviation*. 2013, 165(11): 94-95. (in Chinese)
- [15] 王新东. 空管班组资源管理策略及搭配方法探究[J]. *科技创新与应用*, 2015(21): 269.