

丹野久教授主持“日本寒地北海道糯米品质改良与预研气候变暖对2030年代水稻生长的影响”特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.05.005

丹野久. 全球变暖对日本寒地北海道2030年代水稻生育的影响预测及其对策[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(5): 85-98.

TANNO H. Prediction of the influence of global warming on rice growth in the 2030s in Hokkaido, the coldest region in Japan and the measures to be taken for sustained production[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(5): 85-98.

全球变暖对日本寒地北海道2030年代水稻生育的影响预测及其对策

丹野 久

(日本水稻品质·食味研究会, 日本 东京都中央区, 104-0033)

摘要: 北海道从1980年代开始到2010年代为止, 水稻大田栽培期间的5-9月份气温随着年代而不断上升。与最近的2010年代(2010—2019年平均)相比, 使用两种2030年代的预测气象, 根据以往研究得到的关系方程预测研究了水稻生育。其结果, 2030年代比2010年代, 插秧日期期限(插秧最早期限)比水稻栽培17个地区平均值要早8~9天。另外, 抽穗日期最早期限要早1~5天, 抽穗日期最晚期限要晚1~5天, 安全抽穗期间要长2~10天, 抽穗日期要早1~3天。由于从抽穗日期到最晚抽穗为止要长2~9天, 延迟型冷害的发生要略少。关于各生育期的气象, 抽穗前24天以后的30天期间的平均气温因为生育早而相同或略低。抽穗前10天以后的40天期间以及抽穗日期以后的40天期间的平均气温略高, 日射量略少。因此, 糙米产量为96%~98%, 要略低, 显示潜在产量特性的气候灌浆量指数相同。因为与障碍秕粒发生有关的孕穗期冷害危险期的平均气温略低或基本相同, 带来发生冷害的风险。另一方面, 引起秕粒发生的低温区的出现频率在地区间具有差异。虽然大米蛋白质含量相同, 但直链淀粉含量略低、食味略良。关于米粒外观品质, 受害粒比率和着色粒比率没有一定的变化趋势, 未熟粒比率略高, 大米白度相同, 糙米白度略高。通过上述预测研究显示了未来日本寒冷地带水稻生育的技术应对方向。

关键词: 全球变暖; 2030年代; 出穗期; 糙米产量; 秕粒发生; 米粒外观品质; 食味关联品质; 寒冷地带

中图分类号: TS5-33; S511 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)05-0085-14

网络首发时间: 2022-09-01 10:22:54

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220831.1827.014.html>

Prediction of the Influence of Global Warming on Rice Growth in the 2030s in Hokkaido, the Coldest Region in Japan and the Measures to Be Taken for Sustained Production

Hisashi TANNO

(Japanese Society for Rice Quality and Palatability, Chuo-ku, Tokyo 104-0033, Japan)

收稿日期: 2022-06-05

作者简介: 丹野 久, 男, 1957年出生, 博士, 教授, 研究方向为稻米品质改良方面的育种栽培、生产技术及其品质关系。E-mail: bun01_0405@yahoo.co.jp。本专栏背景及作者介绍详见 PC11-C15。本文日语原文详见 P99-113。

Abstract: The mean air temperature from May to September, during which the rice plant is cultured in the paddy field in Hokkaido, has increased during the four decades from 1980 to 2019. The growth of rice in the 2030s in comparison to the most recent decade (2010–2019) was predicted using two predicted weathers for the 2030s and the previously reported relational expression. In the 2030s, the critical planting date (early limit of planting day) will be 8~9 days earlier than that in the 2010s. The early limit of heading date will also be 1~5 days earlier, and the late limit of heading date will be 1~5 days later. Therefore, the safe heading period will be 2~10 days longer and the heading date will be 1~3 days earlier. As the period between heading date and late limit of heading will be 2~9 days longer, cool summer damage due to delayed growth will decrease slightly. Concerning the weather at different growth stages, the average air temperature will be the same or lower for the earlier growth during the 30 days after 24 days before heading. During the 40 days after 10 days before heading and during the 40 days after heading, the average air temperature will be slightly higher, and the amount of solar radiation will be slightly lower. Then the grain yield will be slightly lower (96%~98%), and the agroclimatic index for expressing the potential of grain yield will be the same. As the average air temperature during the critical stage of chilling injury at the booting stage, which is related with occurrence of male sterility, will be slightly lower or the same, the risk of occurrence of cool weather damage will remain. On the other hand, the appearance frequency of low temperature, which causes sterility, will vary depending on the area. The protein content of milled rice will be the same and the amylose content will be slightly lower. Therefore, the palatability will be slightly better. On the appearance quality of rice grain, there will be no consistent tendency between the 2030s and the 2010s in the percentages of damaged grain and of colored grain, and the percentage of immature grain will be slightly higher. Although the whiteness of milled rice will be the same, the whiteness of brown rice will be slightly higher. The measures to be taken in response to the above predictions are discussed, for rice growth in the future in the coldest region, Japan.

Key words: global warming; 2030s; heading date; grain yield; occurrence of male sterility; appearance quality of rice grain; palatability property; cold region

北海道与日本东北部以南相比由于气候条件寒冷, 气象变动对水稻生育的影响大, 全球气候变暖给水稻生育带来很大的影响。也就是说, 水稻生育期间的气温上升使可插秧日期和抽穗日期提前, 灌浆期间的秋天气温升高而使生育期间延长。事实上, 我们确认到, 随着年份的变化, 抽穗日期变早, 糙米产量变高 (图 1、图 2)。

比如, 东北地区的青森县, 秋田县以及山形县比北海道气温高产量高^[1]。今后, 由于气候变暖使得北海道的气象接近日本的东北地区, 从而产量会提高。以往北海道每 4 年发生一次的冷害, 给北海道水稻的收成带来很大影响。特别是孕穗期冷害危险期的低温增加秕粒的发生, 造成障碍型冷害^[2]。但是, 近年的产量比较稳定 (图 2), 今后气候变暖也许会降低冷害发生的频率。

另一方面, 灌浆期间的气温越高影响大米食味的直链淀粉含量就越低^[3-4]。出穗后 40 天期间 (以下称“灌浆期”) 的日平均累计气温 (以下称“灌浆气温”) 在 843 °C, 即平均气温基本上 21 °C

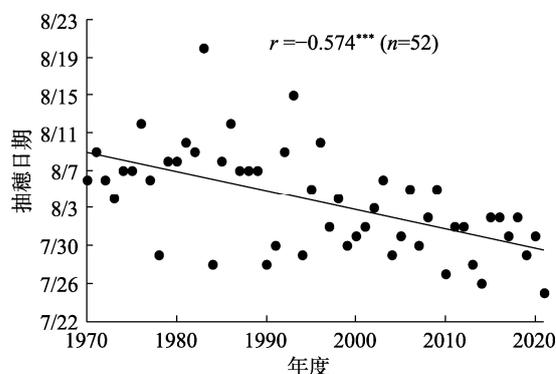


图 1 年度与抽穗日期之间的关系

注: 实线的回归方程, 斜率为-0.204 6, 纵截距为 9/16。本图数据来自农林水产省大臣官房统计部编写的水稻耕种日期 (最盛期) 一览表 (各都道府县)^[1]。

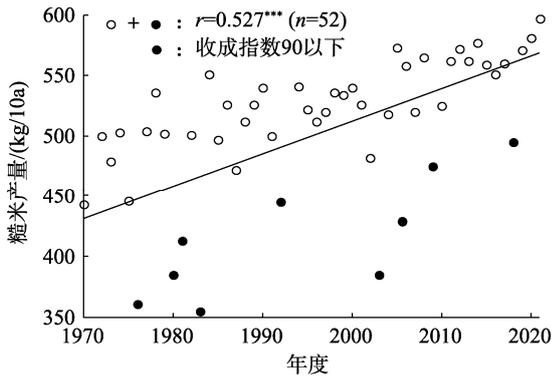


图 2 年度与糙米产量之间的关系

注: 实线的回归方程, $y=2.683 9x-4 855.8$ 。本图的数据来自农林水产省大臣官房统计部编写的作物统计收获量累年统计水稻北海道^[1]。

以上时, 其值越高, 大米蛋白质含量越高^[5]。今后, 灌浆气温的上升对食味来言, 有可能直链淀粉含量往正方向、大米蛋白质含量往负方向影响。关于糙米外观品质, 以往低温年份由于灌浆不良会产生青未熟粒和腹部垩白米粒, 今后担心高温年份发生白未熟粒^[6]。

正如以上所述, 虽然气候变暖对水稻生育带来很大的影响, 但是阐明其影响的相关论文较少。因此, 在本论文中, 关于水稻移植栽培中的生育、糙米产量、孕穗期冷害危险期的低温引起的秕粒发生风险、食味关联品质以及米粒外观品质, 与 2010 年代 (2010—2019 年平均) 相比其 2030 年代有何变化, 根据以往文献^[5, 7-10]中这些品质与气象值之间的关系以及 2030 年的预测气象和最近的 2010 年代气象进行了阐明, 并显示了对这些日本寒冷地带水稻生育预测研究的技术应对方向。

1 实验方法

1.1 气象数据

为了与 2030 年代的预测气象做比较, 作为近期的以往气象使用了 2010 年代, 即 2010—2019 年的平均。其理由为: 从北海道水稻栽培的 17 个地区其 1980—2010 年代的每 10 年平均值的变化可以知道, 在主要的水稻大田生育期间中抽穗前营养成长期的 5—7 月份以及抽穗后灌浆期的 8—9 月份的日平均累计气温都随着年代而上升 (图 3)。另外, 降水量除了 8—9 月份不是很明显以外, 5—7 月份随着年代有所增加 (图 4), 这两

个时期的日照量都是增加的趋势 (图 5)。有关水稻生育方面的研究中, 为了减少局部或短期发生

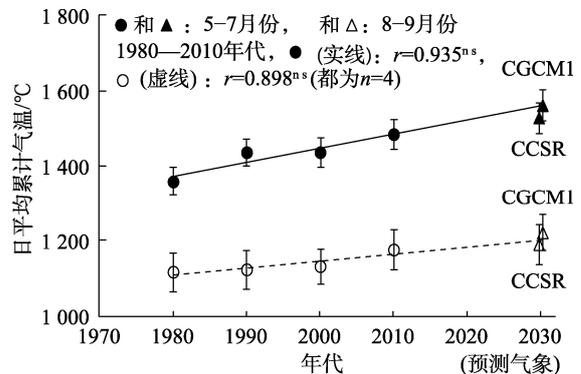


图 3 年代与 5—7 月份, 8—9 月份的日平均累计气温之间的关系 (水稻栽培的 17 个地区平均)

注: 1980 年代为 1980—1989 年的平均。回归方程, 实线 $y=3.766 2x-6 083.3$, 虚线 $y=1.847 4x-2 547.3$ 。1980—2010 年代为地域气象观测系统的观测值, CCSR 以及 CGCM1 为根据地域气象观测系统的预测值。以后的图表也同样。误差线为标准偏差。

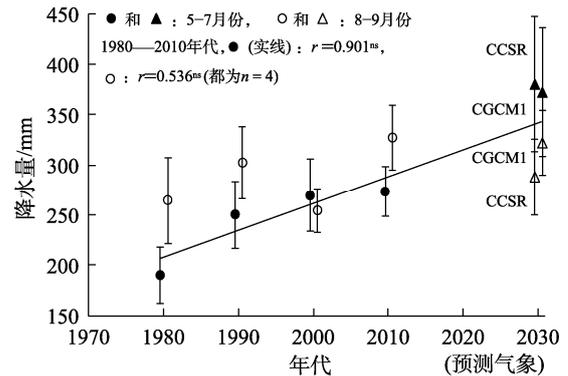


图 4 年代与 5—7 月份, 8—9 月份的降水量之间的关系 (水稻栽培的 17 个地区平均)

注: 年代参照图 1 的脚注。实线的回归方程, $y=2.689 4x-5 118.9$ 。误差线为标准偏差。

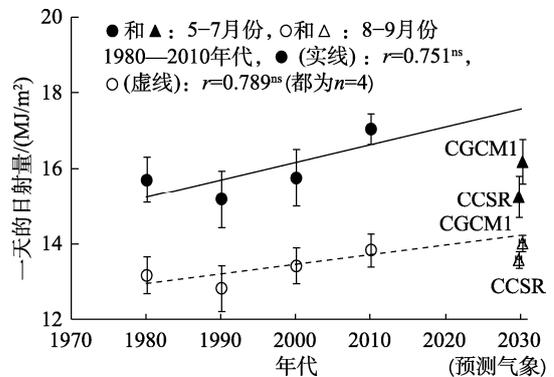


图 5 年代与 5—7 月份, 8—9 月份一天的日照量之间的关系 (水稻栽培的 17 个地区平均)

注: 年代参照图 1 的脚注。回归方程, 实线为 $y=0.046 2x-76.205$, 虚线为 $y=0.025 9x-38.435$ 。误差线为标准偏差。

的变动影响,平常年份的气象通常使用将过去 30 年平均后的地域气象观测系统平均值^[11-13]。但是,过去 30 年期间的数据中,无法充分放映出有明显变化的最近气象。

2030 年代的气象数据使用了 Yokozawa et al. (2003)^[14]的「日本网格气候变化数据 (Mesh Climate Change Data of Japan)」全球气候模型中,与 IPCC (气候变动政府间机构) 第 4 次报告书和日本气象厅地球温暖化情报第 6 号的将来预测比较接近的 CCSR/NIES (以下称 CCSR) 以及 CGCM1 这两个模型计算的预测值^[11]。这些 2030 年代预测气象值与 2010 年代的气象值相比,日平均累计气温都是 5-7 月份和 8-9 月份略高,降水量具有 5-7 月份多而 8-9 月份略少的倾向,日照量特别是在 5-7 月份要少 (图 3~5)。两种预测气象中,CGCM1 比起 CCSR,5-7 月份以及 8-9 月份的日平均累计气温都高,8-9 月份的降水量多,日照量在这两个期间都多。

2030 年代预测气象中,将北海道水稻栽培地区的 5-9 月份日平均累计气温与日本东北北部的水稻栽培地区 2010 年代气象相比,北海道北部除外的北海道中央部以南,比青森县温暖的日本海一侧的黑石市要低,但与太平洋一侧的十和田市相接近。另外,北海道 2030 年代预测气象中的同时期日平均累计气温也比青森县以南的秋田县和岩手县的 2010 年代气象明显要低 (表 1)。

1.2 插秧日期期限、抽穗日期最早期限、抽穗日期最晚期限以及抽穗日期的推测

(1) 根据北海道不同地带水稻优良品种的种植指标中的地带区分,将推测对象地区定为 17 个地区。下面陈述的预测计算结果,除了《1.4 孕穗期冷害危险期的秕粒发生风险推测》以外,都为这 17 个地区的平均。这 17 地区为北见市、名寄市 (风连)、士别市 (士别)、旭川市、中富良野町、小平町、雨竜町、深川市、岩见沢市、新篠津村、长沼町、惠庭市、厚真町、共和町、新雪谷町、北斗市以及江差町。

(2) 插秧日期期限 (插秧日期最早期限)、抽穗日期最早期限以及最晚期限的推测使用了北海道不同地带水稻优良品种的种植指标中的以下

表 1 北海道水稻栽培 5 个地区以及日本东北北部水稻栽培 5 个地区的 2010 年代 (2010—2019 年平均值) 和 2030 年代预测气象 (CCSR 和 CGCM1) 的 5-9 月份日平均累计气温

地区名称	(县名)	(市名)	北纬(度), 东经(度)	气象类别	5-9 月份 日平均累 计气温/°C
北海道 (北部)		名寄市	44.3, 142.5	2010 年代	2 525
				CCSR	2 621
				CGCM1	2 713
北海道 (中央部)		旭川市	43.8, 142.8	2010 年代	2 683
				CCSR	2 695
				CGCM1	2 784
北海道 (中央部)		深川市	43.7, 142.1	2010 年代	2 653
				CCSR	2 834
				CGCM1	2 920
北海道 (中央部)		岩见沢市	43.2, 141.8	2010 年代	2 749
				CCSR	2 761
				CGCM1	2 838
北海道 (南部)		北斗市	41.8, 140.6	2010 年代	2 756
				CCSR	2 833
				CGCM1	2 859
东北北部	青森县	十和田市	40.6, 141.2	2010 年代	2 855
东北北部	青森县	黑石市	40.6, 140.6	2010 年代	2 987
东北北部	岩手县	雫石町	40.0, 141.4	2010 年代	2 956
东北北部	岩手县	北上市	39.3, 141.1	2010 年代	3 210
东北北部	秋田县	大馆市	40.3, 140.6	2010 年代	3 093

注:东北地区的气温来自地域气象观测系统的观测值。北海道的的气温参照图 3 的脚注。

方法 (图 6)。插秧日期期限为插秧后 5 天中的日最高最低平均气温在中苗毯 (以下称“中苗”) 时达到 12.0 °C, 在成苗钵 (以下称成苗) 时达到 11.5 °C 的日期。抽穗日期最早期限为与障碍型秕粒发生关系密切的抽穗 24 天前开始的 30 天期间 (以下称“障碍型危险期”) 的日最高最低平均气温的平均值达到 20 °C 的日期。这是确保孕穗期耐冷性较强品种 (比如“闪光 397”) 的结实率为 80%, 达到所需气温时的第一天。

抽穗日期最晚期限在北海道以往定为能确保灌浆气温 750 °C 的日期^[7]。但是,在位于北海道南面而比北海道的的水稻栽培期间的气温高的日本东北地区,抽穗日期最晚期限定为能确保灌浆气温 800 °C 以上的日期^[15]。近年,北海道的灌浆气温不断升高,为了充分确保灌浆气温提高米粒外观品质,修改了北海道不同地带水稻优良品种的种植标准,将抽穗日期最晚期限所需要的灌浆气温

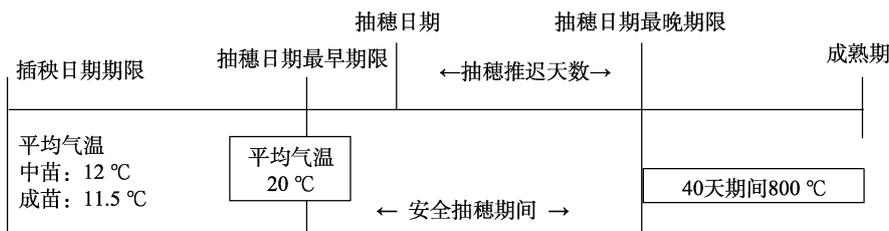


图 6 插秧日期期限 (插秧日期最早期限), 抽穗日期期限 (抽穗日期最早期限, 抽穗日期最晚期限), 抽穗日期以及抽穗推迟天数之间的关系^[7-8,13]

注: 插秧日期期限为从插秧日开始的 5 天之间的平均气温在中苗时超过 12 °C, 在成苗时超过 11.5 °C 时的日期。抽穗日期最早期限为从抽穗前 24 天开始的 30 天之间平均气温达到 20.0 °C 时的日期。抽穗日期最晚期限为从抽穗日期第二天开始的 40 天期间的日平均累计气温超过 800 °C 的日期。

接近于日本东北地区的 800 °C 水准^[13]。因此, 在本论文中将抽穗日期最晚期限定为能确保灌浆气温 800 °C 的日期。

安全抽穗期间为两种抽穗日期期限 (最早抽穗日期期限和最晚抽穗日期期限) 之间的期间。而将下项 (3) 中推测的抽穗日期到抽穗日期最晚期之间的期间作为抽穗推迟天数。

(3) 在推测抽穗日期时, 作为一天的发育速度累计值, 通过发育指数^[16-17] (表 2, 出芽时为 0, 幼穗形成期为 1, 抽穗期为 2) 由平均气温进行了抽穗日期推测。使用品种为 1990 年代开始的核心品种, 并占 2020 年粳稻种植面积 11% (10 205 ha) 的中稻品种「闪光 397」, 计算时的品种固有参数使用了以往的研究成果^[16]。此外, 2019 年北海道粳稻种植面积中, 与「闪光 397」同样的中稻品种占了大部分^[13]。

表 2 发育指数模型的计算公式 (上部) 以及北海道中稻品种「闪光 397」的发育速度参数 (下部)^[16]

1 天的发育速度, $DVR = 1/(1 + \exp(-A(T-Th)))/G$		
发育指数, $DVI = \sum DVR$		
T: 日平均气温		
A, Th, G 为品种固有的参数		
DVI 在发芽时, 幼穗形成期以及抽穗期分别为 0、1、2		
参数	插秧-幼穗形成期	幼穗形成期-抽穗期
A	0.286 1	0.298 3
Th	17.07	15.85
G	28.95	20.93
中苗插秧时 DVI	0.325 8	
成苗插秧时 DVI	0.434 4	

计算开始日期的插秧日期在 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象中都使用了北海道 2010

年代的平均, 即 5 月 25 日 (表 3)。秧苗的种类为现在插秧栽培主体的中苗和成苗, 各占 2019 年种植面积的 29% 和 66%^[13]。但是, 在后述的“1.3 糙米产量以及气候灌浆量指数的推测”中使用了中苗和成苗的平均进行了计算。

表 3 北海道, 东北 6 个地区以及中部长野县的水稻栽培作业季节和抽穗日期 (月日) (2010—2019 年平均)

地区名称	北纬 (度)	东经 (度)	播种日期	插秧日期	抽穗日期	收获日期
(县名)	平均 SD	平均 SD	平均 SD	平均 SD	平均 SD	平均 SD
北海道	43.1,	141.3	4-21	5-25	7-30	9-27
东北 青森县	40.8,	140.7	4-14	5-20	8-4	10-1
东北 岩手县	39.7,	141.2	4-15	5-17	8-5	10-3
东北 宫城县	38.3,	140.9	4-11	5-11	8-2	9-30
东北 秋田县	39.7,	140.1	4-21	5-22	8-3	10-1
东北 山形县	38.2,	140.4	4-19	5-18	8-5	10-1
东北 福島县	37.8,	140.5	4-17	5-17	8-8	10-8
中部 長野县	36.7,	138.2	4-20	5-21	8-6	9-29

注: 经纬度为北海道厅以及各县厅所在地。数据来自农林水产省大臣官房统计部编, 水稻的耕种日期 (最盛期) 一览表 (各都道府县)^[11]。

从推测的抽穗日期得到各生育期的气象数据, 在后述的 1.3~1.5 项中, 分别用于推测糙米产量以及气候灌浆量指数, 孕穗期冷害危险期的秕粒发生风险, 食味关联品质和米粒外观品质。

(4) 在计算插秧日期期限, 抽穗日期最早期限以及最晚期限时, 以前使用了日最高最低平均气温。此气温与复数测定值平均后的地域气象观测系统平均气温相比, 7 月份为峰值要高, 5 月中旬和 9 月中旬基本相同, 在这之前和之后变低。因此, 计算抽穗日期最早期限时在地域气象观测系统平均气温上加了 0.5 °C, 在计算插秧日期期

限和抽穗日期最晚期限时使用了地域气象观测系统平均气温的原有值。

1.3 糙米产量和气候灌浆量指数的推测

使用以下 (1)~(3) 的方法, 评价了 2010 年代气象和 2030 年代预测气象的产量特性。

(1) 在 1999—2006 年的北海道 15 个地区的数据中, 糙米产量与灌浆期累计日照量之比和障碍危险期的平均气温之间具有二次回归的关系 (表 4, 图 7), 根据此二次回归方程计算了糙米产量。

表 4 本论文中使用的糙米产量、食味关联品质以及米粒外观品质与抽穗前 24~30 天期间的平均气温 (x_{ct})、从抽穗 10 天前开始的 40 天期间的平均气温以及平均日射量 (分别为 x_{dt} , x_{dr})、抽穗后 40 天期间的日平均累计气温、平均气温以及累计日射量 (分别为 x_{ft} , x_{ft2} , x_{fr}) 之间的回归方程

品质	回归方程	决定系数 (R^2)	数据			
			试验地	年度	地区	数据数量
糙米产量	$y/x_{ft}=421.89-0.0456(x_{ct}-21.0)^2$	0.321	北海道	8	15	120
糙米白度	$Y=0.0158x_{ft}+5.70$	0.747	北海道	8	14~15	119
大米白度	$Y=0.4079x_{ct}+0.0082x_{ft}+22.26$	0.464	北海道	8	14~15	119
未熟粒比率	$Y=0.000930(x_{ft}-803.1)^2+9.2$	0.473	北海道	8	14~15	119
受害粒比率	$Y=-3.838x_{ct}-0.02836x_{ft}+108.98$	0.629	北海道	7	14~15	104
着色粒比率	$Y=-0.0852x_{ct}-0.00122x_{ft}+2.94$	0.507	北海道	6	15	90
直链淀粉含量	$Y=-0.0137x_{ft}+31.78$	0.652	北海道	14~16	12~15	236
大米蛋白质含量	$Y=0.0000425(x_{ft}-849.4)^2+7.36$	0.185	北海道	14~16	12~15	236
糙米产量	$y/x_{dr}=-39.20-0.3496(x_{dt}-22.1)^2$	0.253	日本高产道县	26	9	234
气候灌浆量指数 ^[9]	$y/x_{ft}=1.28-0.0192(21.9-x_{ft2})^2$	-	日本全国	-	152	-

注: 上排为 1999—2006 年^[10], 中排为 1991—2006 年^[5], 下排的糙米产量来自农林水产省大臣官房统计部编写的水稻耕种日期 (最盛期) 一览表 (各都道府县)^[11] 以及作物统计收获量累年统计水稻^[1] (1996—2021 年)。

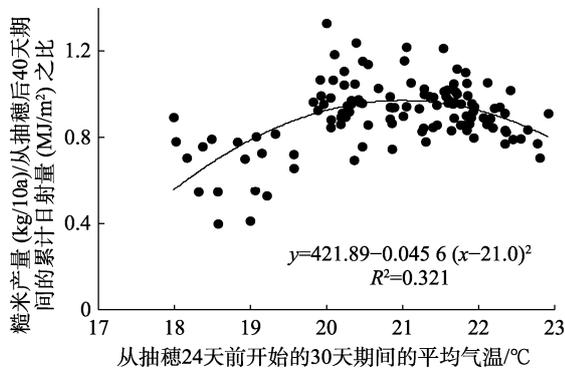


图 7 北海道从抽穗 24 天前开始的 30 天期间的平均气温与糙米产量 / 抽穗后 40 天期间的累计日射量之比之间的关系

注: 根据北海道 15 个地区 1999—2006 年的数据 (表 4 的上排)。

(2) 在包括高产的北海道在内的日本全国 9 个地区 1994—2021 年数据中, 糙米产量与抽穗 10 天前开始的 40 天期间的平均日照量之比和同期间的平均气温之间具有二次回归的关系^[18] (表 4, 图 8), 根据此二次回归方程计算了糙米产量。

(3) 在日本全国的水稻推荐品种决定试验成绩数据中, 气候灌浆量指数与灌浆期累计日照量之比和抽穗后 40 天期间的平均气温具有二次回

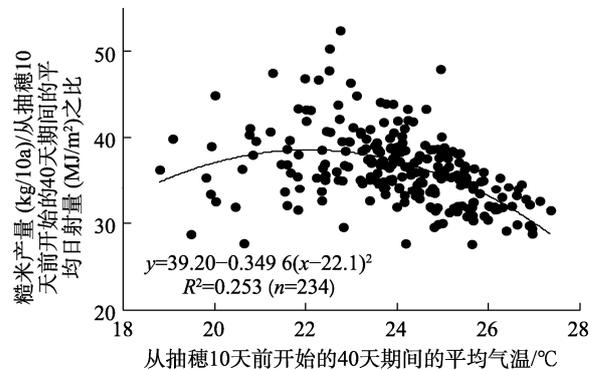


图 8 包括北海道在内的日本高产 9 个地区的从抽穗 10 天前开始的 40 天期间的平均气温与糙米产量 / 同期间的平均日射量之比之间的关系

注: 根据 1996—2021 年的数据 (表 4 的下排)。

归的关系^[9] (表 4)。此二次回归方程是数据中对相同的灌浆期平均气温, 使用了气候灌浆量指数与灌浆期累计日照量之比的最大值计算的。因此, 根据此方程得到的气候灌浆量指数表示了潜在的产量。

1.4 孕穗期冷害危险期的秕粒发生风险推测

以北海道水稻栽培地区中产量稳定的中央部

3 个地区 (旭川市、深川市和岩见泽市) 以及产量略不稳定的北部 1 个地区 (士别市)、面临太平洋的东部 1 个地区 (厚真町)、面临太平洋的西南部 1 个地区 (北斗市) 一共 6 个地区为对象, 使用上述 1.2 (3) 的方法计算发育指数, 将 1.4~1.7 的期间作为孕穗期冷害危险期 (一般为抽穗前 10~11 天为中心的前后一周) [16]。

2030 年代的日平均气温是在由 1971—2000 年的 30 年观测值制作的地域气象观测系统网格数据与 2030 年代预测气象之间的气温差基础上, 加上离对象地区最近的地域气象观测系统观测点的 1978—2000 年日平均气温得到的。然后, 针对计算出的 2030 年代 (23 年)、2010 年代的 2010—2019 年 (10 年) 以及作为参考的 1978—2000 年 (23 年), 计算各年份的孕穗期冷害危险期的平均气温, 得到各地区的平均和频数分布。

1.5 食味关联品质和米粒外观品质的推测

食味关联品质的直链淀粉含量和大米蛋白质含量的推测是根据从 1991—2006 年北海道 12~15 个地区的试验数据得到的直链淀粉含量与灌浆气温之间的一次回归方程和大米蛋白质含量与灌浆气温之间的二次回归方程推测的 (表 4)。

米粒外观品质的推测与上述 1.3 (1) 的糙米产量推测一样, 使用了从根据 1999—2006 年的 6~8 年北海道 15 个地区的数据得到的回归方程, 即糙米白度与灌浆气温之间的一次回归方程, 大米白度、受害粒比率、着色粒比率与障碍危险期的平均气温和灌浆气温之间的多重回归方程, 未熟粒比率与灌浆气温之间的二次回归方程 (表 4)。

2 结果及考察

2.1 插秧日期期限、抽穗日期最早期限和最晚期限、抽穗日期以及各生育期气象的变化

2030 年代预测气象 (以下称 “2030 年代”) 的插秧日期期限在 17 个地区分中苗和成苗与 2010 年代气象 (以下称 “2010 年代”) 相比较, 比 2010 年代的 5 月 15、16 日, CCSR 要早 8~10 天, CGCM1 要早 7~9 天 (表 5)。

表 5 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象的水稻中苗, 成苗的插秧日期期限 (水稻栽培 17 个地区的平均)

统计项目	2010 年代 (2010—2019 年平均)		2030 年代预测气象			
			CCSR		CGCM1	
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
平均	5-16	5-15	5-8	5-5	5-9	5-6
标准偏差	0.80	0.96	3.1	3.3	2.2	2.4
最小值	5-15	5-13	5-2	4-29	5-5	5-2
最大值	5-17	5-16	5-14	5-11	5-13	5-10

注: 插秧日期期限 (插秧日期最早期限) 参照图 6。

抽穗日期的最早期限和最晚期限在 2010 年分别为 7 月 19 日和 8 月 8 日, 与其相比 CCSR 的最早期限要早 1 天, 最晚期限要迟 1 天, 安全抽穗期间比 2010 年代的 20 天要长两天。CGCM1 的最早和最晚期限与 2010 年代相比分别早 5 天和迟 5 天, 安全抽穗期间要长 10 天 (表 6)。

抽穗日期分别按照中苗和成苗进行了比较 (以下相同), 与 2010 年代的 8 月 2 日和 7 月 29 日相比, CCSR 要早 0~1 天, CGCM1 要早 3 天。因此, 抽穗推迟天数与 2010 年代的 5~9 天相比, CCSR 要长 2 天, CGCM1 要长 9 天 (表 6)。

此外, 在各生育期气象的平均气温上, 障碍危险期 (期间的平均) 与 2010 年代的 21.1 °C 相比, CCSR 略低, 为 -0.3 °C, CGCM1 相同, 为 0.0 °C。而抽穗前 10 天开始的 40 天期间 (期间的平均) 以及灌浆期 (期间的累计) 分别与 2010 年代的 21.5 °C、829~846 °C 相比, CCSR 基本相同, 0.0 °C、+2~+6 °C, CGCM1 较高, 为 +0.7 °C、+34~+40 °C。另一方面在日照量上, 抽穗前 10 天开始的 40 天期间 (期间的平均) 和灌浆期 (期间的累计) 分别与 2010 年代的 15.2、579 MJ/m² 相比, CCSR 和 CGCM1 都要少, 分别为 95%~98%、96%~99% (表 7)。

2.2 糙米产量以及气候灌浆量指数的变化

根据上述 1.3 的方法 (1) 和方法 (2) 得到的 2030 年代推测糙米产量, 分别与 2010 年代的 568、581 kg/10a 相比, 方法 (1) 时 CCSR 为 97%、CGCM1 为 99%, 方法 (2) 时分别为 95%、97% 都略低。方法 (3) 的气候灌浆量指数与 2010 年代的 723 kg/10a 相比, CCSR 为 98%, CGCM1 为 101%, 都是基本相同 (表 8)。在方法 (1)~(3)

表 6 2010 年代气象和 2030 年代预测气象的抽穗日期期限、安全抽穗期间以及抽穗日期、抽穗推迟天数 (水稻栽培的 17 个地区平均)

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)										2030 年代预测气象 CCSR										CGCMI										
	抽穗日期期限/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		抽穗推迟天数/天		抽穗日期期限/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		安全抽穗期间/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		抽穗推迟天数/天		抽穗日期期限/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		安全抽穗期间/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		抽穗推迟天数/天		抽穗日期期限/ (月/日)		抽穗日期/ (月/日)		
	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	中苗	成苗	抽穗日期最早期限	抽穗日期最晚期限	
平均值	7-19	8-8	20	8-2	7-29	5	9	7-18	8-9	22	8-2	7-28	7	11	7-14	8-13	30	7-30	7-26	14	18										
标准偏差	3.3	5.8	7.5	2.5	2.2	7.0	6.7	3.9	7.3	9.6	2.2	2.1	8.4	8.2	4.3	5.8	7.3	2.1	2.0	6.0	6.0										
最小值	7-13	7-28	6	7-29	7-26	-8	-3	7-14	7-28	1	7-30	7-25	-10	-5	7-4	8-6	17	7-26	7-23	4	8										
最大值	7-24	8-22	38	8-6	8-2	22	26	7-27	8-25	41	8-7	8-2	25	29	7-21	8-26	44	8-3	7-30	27	31										

注: 抽穗日期最早期限, 抽穗日期最晚期限, 安全抽穗期间以及抽穗推迟天数参照图 6。插秧日期为 5 月 25 日。

表 7 本论文中推测糙米产量、气候灌浆指数、食味关联品质以及米粒外观品质时使用的 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象的各生育期气象 (水稻栽培的 17 个地区平均)

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)										2030 年代预测气象 CCSR										CGCMI									
	抽穗前 24~30 天期间的平均气温/°C		从抽穗 10 日前开始的 40 天期间的平均气温/°C		抽穗后 40 天期间的平均气温/°C		抽穗前 24~30 天期间的平均气温/°C		从抽穗 10 日前开始的 40 天期间的平均气温/°C		抽穗后 40 天期间的平均气温/°C		抽穗前 24~30 天期间的平均气温/°C		从抽穗 10 日前开始的 40 天期间的平均气温/°C		抽穗后 40 天期间的平均气温/°C		抽穗前 24~30 天期间的平均气温/°C		从抽穗 10 日前开始的 40 天期间的平均气温/°C		抽穗后 40 天期间的平均气温/°C		抽穗前 24~30 天期间的平均气温/°C		从抽穗 10 日前开始的 40 天期间的平均气温/°C		抽穗后 40 天期间的平均气温/°C	
	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)	日平均气温/°C	日射量/(MJ/m ²)
平均值	21.1	21.5	15.2	15.2	829	846	579	20.8	21.5	14.4	835	848	566	21.1	22.2	14.6	869	880	575											
(平均值差异或之比)	-	-	(100)†	(100)†	-	-	(100)†	(-0.3)	(0.0)	(95)†	(6)	(2)	(98)†	(0.0)	(0.7)	(96)†	(40)	(34)	(99)†											
标准偏差	0.27	0.59	0.65	0.65	35.8	32.3	26.9	0.38	0.64	0.61	35.1	31.1	19.1	0.37	0.48	0.60	27.9	25.1	20.4											
最小值	20.8	20.5	14.4	14.4	764	789	541	19.9	20.1	12.8	765	784	519	20.3	21.2	13.2	817	831	522											
最大值	21.7	23.0	16.0	16.0	918	927	630	21.5	22.6	15.4	901	907	595	21.9	23.1	15.6	922	926	604											

注: 平均值差异为 2030 年代预测气象的平均值减去 2010 年代气象的平均值, 平均值之比为 2030 年代预测气象的平均值与 2010 年代气象的平均值的比率 (2010 年代气象的平均值为 100)。没有特别记载时, 为中苗和成苗的平均。插秧日期为 5 月 25 日。抽穗日期参照表 6。

与 2010 年代之比的平均上,CCSR 略低,为 97%,CGCM1 基本相同,为 99%。

表 8 根据 2010 年代和 2030 年代预测气象的各生育期气象推测的糙米产量以及气候灌浆量指数 (kg/10a)
(水稻栽培的 17 个地区平均)

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)			2030 年代预测气象					
	糙米产量 [†]	糙米产量 [‡]	气候灌浆量指数	CCSR			CGCM1		
	产量 [†]	产量 [‡]	指数	产量 [†]	产量 [‡]	指数	产量 [†]	产量 [‡]	指数
平均值	568	581	723	553	551	709	562	562	731
(平均值之比/%)	(100)	(100)	(100)	(97)	(95)	(98)	(99)	(97)	(101)
标准偏差	24.8	26.6	45.8	22.4	24.0	33.8	21.1	23.4	28.2
最小值	532	534	628	502	493	626	511	507	662
最大值	608	617	792	580	591	753	595	601	772

注:平均值之比为 2030 年代预测气象的平均值与 2010 年代气象的平均值的比率(2010 年代气象的平均值为 100)。糙米产量,† 以及‡ 分别根据从北海道的 15 个地区 1999—2006 年,包括北海道在内的全国高产的 9 个地区 1996—2021 年的数据得到的回归方程(表 4)。气象数据根据表 7。

障碍危险期的平均气温与产量最高的 21.0 °C (表 4,图 7)相比,2010 年代和 CGCM1 都是 21.1 °C,基本相同,CCSR 略低为 20.8 °C。在抽穗前 10 天以后的 40 天期间和灌浆期的平均气温上,与糙米产量以及气候灌浆量指数最高的 22.1、21.9 °C (表 4,图 8)相比,2010 年代为 20.9 (灌浆气温 829~846 °C 的平均气温,以下相同)~21.5 °C,CCSR 较低为 21.0 (835~848)~21.5 °C,CGCM1 相近为 21.9 (869~880)~22.2 °C。另一方面,在日照量上,与 2010 年代抽穗前 10 天以后 40 天期间的平均日照量 15.2 MJ/m² 相比 CCSR,CGCM1 较低,分别为 95%、96%,同样地与 2010 年代灌浆期的累计日照量 579 MJ/m² 相比要略低分别为 98%、99%。根据以上结果,CCSR 的障碍危险期的平均气温低,抽穗前 10 天以后 40 天期间以及灌浆期的日照量要略少是产量低的原因(表 7)。

此外,使用日本产量高的北海道(559 kg/10a,2010—2021 年的平均值,以下相同)、东北 6 个县(550~608 kg/10a)以及最高产的中部地区长野县(613 kg/10a)这 8 个地区的数据,对最近的

北海道糙米产量与抽穗前 10 天以后的 40 天期间平均日照量以及同期间的平均气温之间的关系进行了探讨(表 9)。北海道的糙米产量在 8 个地区中为中上,排第 5 位,北海道同期间的平均气温为 21.8 °C 和其它 7 个地区的 23.5~25.8 °C 相比,最接近糙米产量最高的 22.1 °C (表 4,图 8)。但是,北海道同期间的平均日照量 16.2 MJ/m² 和糙米产量第 2 位的青森县 16.3 MJ/m² 一起要比其它糙米产量前 3 名地区的 16.8~17.6 MJ/m² 要少。而且,这 8 个地区的同期间平均日照量越多,其糙米产量就越高($r=0.725^*$, $n=8$)。所以,相比日本其它的高产地区,北海道同期间的平均日照量要少,这也是影响糙米产量的因素。

表 9 包括北海道在内的日本全国高产 8 个地区的糙米产量以及抽穗 10 天前开始的 40 天期间的平均气温和日照量 (2010—2021 年平均)

地区名称 (县名)	糙米产量		抽穗前 10 天开始的 40 天期间的平均值			
	平均	SD	日平均气温/°C		日照量/(MJ/m ²)	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD
北海道	559	25.7	21.8	0.73	16.2	1.61
东北 青森县	608	13.9	23.5	1.14	16.3	1.09
东北 岩手县	550	8.7	24.9	1.06	14.9	1.68
东北 宫城县	550	6.2	24.6	0.87	15.4	2.02
东北 秋田县	579	18.6	25.2	0.86	16.8	1.62
东北 山形县	608	14.7	25.8	0.87	17.6	1.65
东北 福岛县	557	4.3	24.7	1.02	16.9	1.81
中部 长野县	613	10.8	24.6	0.85	17.6	1.84

注:各地区经纬度见表 3,糙米产量见表 4 底部脚注。

2.3 孕穗期冷害危险期粒粒发生风险的变化

2030 年代冷害危险期的平均气温(6 个地区平均,分别按照中苗和成苗)与 2010 年代中苗和成苗的 21.6、21.1 °C 相比,CCSR 的差为 -0.3~0 °C,略低;CGCM1 的差为 0~+0.1 °C,基本相同(表 10)。这些数值要低于 6 个地区从 2010 年代到 2030 年代的 7 月份平均上升气温,即 CCSR 的 0.2 °C,CGCM1 的 0.8 °C。其原因可能是 5~7 月份的气温上升使水稻生育提前,冷害危险期的日期要比 2010 年代提前,也就是前移到低温时期。

2010 年代冷害危险期的平均气温 19 °C 或

表 10 1978—2000 年和 2010 年代气象 (2010—2019 年平均) 以及 2030 年代预测气象 (CCSR 和 CGCM1) 的孕穗期冷害危险期的平均气温以及秕粒发生危险性高的同冷害危险期平均气温 19 °C 以下和 18.5 °C 以下年份的比率

项目	气温种类	秧苗种类	北部		中部		靠太平洋的东部	靠太平洋的西南部	平均	
			士别市	旭川市	深川市	岩见沢市	厚真町	北斗市		
冷害危险期的平均气温/°C	1978—2000 年	中苗	21.3	21.4	21.4	21.6	21.0	21.5	21.4	
		成苗	20.8	20.6	20.5	20.5	20.6	20.5	20.6	
	2010 年代	中苗	21.8	22.4	21.3	21.4	21.3	21.3	21.6	
		成苗	20.7	22.2	20.9	21.6	20.2	21.1	21.1	
	2030 年代天气 预报	CCSR	中苗	21.5	21.5	21.6	21.7	21.6	21.4	21.6
		成苗	20.9	20.8	21.0	21.1	20.5	20.7	20.8	
		CGCM1	中苗	21.7	21.7	21.8	21.9	21.6	21.4	21.7
		成苗	21.1	21.2	21.4	21.6	20.6	20.8	21.1	
	平均气温 19 °C 以下的年份比率/%	1978—2000 年	中苗	22	9	4	17	9	4	11
			成苗	17	26	13	17	22	30	21
2010 年代		中苗	0	0	0	0	0	0	0	
		成苗	10	0	10	0	20	0	7	
2030 年代天气 预报		CCSR	中苗	9	0	4	4	9	9	6
		成苗	9	9	0	4	13	13	8	
		CGCM1	中苗	4	4	0	4	9	9	5
		成苗	9	0	0	0	9	13	5	
平均气温 18.5 °C 以下的年份比率/%		1978—2000 年	中苗	17	0	0	0	4	4	4
			成苗	13	9	9	9	13	17	12
	2010 年代	中苗	0	0	0	0	0	0	0	
		成苗	10	0	10	0	10	0	5	
	2030 年代天气 预报	CCSR	中苗	0	0	0	0	4	9	2
		成苗	4	4	0	4	13	13	7	
		CGCM1	中苗	0	0	0	0	4	9	2
		成苗	4	0	0	0	4	13	4	

注：显示了收成稳定的中部 3 个地区以及相比之下不稳定的 3 个地区。将发育指数 (DVI) 为 1.4~1.7 的期间视为孕穗期的冷害危险期 (表 2)。本表中的 2030 年代预测气象是在 1978—2000 年的每年地域气象观测系统观测点气温的基础上，考虑到 1971—2000 年地域气象观测系统网格气温与 2030 年代预测气温间的气温差而得到。

18.5 °C 时，在北部、中央部的 1 个地区、靠太平洋的东部，一共 3 个地区，抽穗早的成苗 (不是中苗) 发生秕粒的风险高。而在 2030 年代这些风险高的年份不管是中苗还是成苗，在所有地区都有发生。特别是在北部、靠太平洋的东部以及西南部，其中靠太平洋的东部以及西南部同一年份的比率要略高 (表 10)。

靠太平洋的西部以及西南部地区，从春季到夏季会吹来湿冷的偏东风，7 月份的气温变动很大。这些地区在 2010 年代气象比较稳定，但如果在本文中 2030 年代平均气温的变动计算时使用的 1978—2000 年气象发生变动的話，对秕粒发生的影响在 2030 年代也不会小。不论如何，在探讨的 6 个地区都有可能出现发生秕粒的气温，在

2030 年代仍然有发生障碍型冷害的风险。

2.4 食味及米粒外观品质的变化

大米蛋白质含量在 2030 年代不管是中苗还是成苗，都相同于 2010 年代的 7.4% (17 个地区平均，以下同样)。直链淀粉含量与 2010 年代中苗和成苗时的 20.4%、20.2% 相比 (以下相同)，CCSR 的差为 -0.1~0 百分点，基本相同；CGCM1 的差为 -0.5 百分点，较低 (表 11)。

与 2010 年代的糙米白度 18.8、19.1 之差，CCSR 为 0~+0.1，基本相同；CGCM1 为 +0.5~+0.6，较高。与 2010 年代的大米白度 37.7、37.8 之差，CCSR 为 -0.1，基本相同，CGCM1 为 +0.3，要略高 (表 12)。

与 2010 年代的未熟粒比率 11.1%、11.9% 之差，CCSR 为 0~+0.2 百分点，基本相同；CGCM1

表 11 根据 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象的抽穗后 40 天期间日平均累计气温推测的直链淀粉含量和大米蛋白质含量 (水稻栽培的 17 个地区平均) %

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)				2030 年代预测气象							
	中苗		成苗		CCSR				CGCM1			
	直链淀粉含量	大米蛋白质含量	直链淀粉含量	大米蛋白质含量	直链淀粉含量	大米蛋白质含量	直链淀粉含量	大米蛋白质含量	直链淀粉含量	大米蛋白质含量	直链淀粉含量	大米蛋白质含量
平均值	20.4	7.4	20.2	7.4	20.3	7.4	20.2	7.4	19.9	7.4	19.7	7.4
(同上差异, 百分点)	-	-	-	-	(-0.1)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(-0.5)	(0.0)	(-0.5)	(0.0)
标准偏差	0.49	0.08	0.44	0.06	0.48	0.07	0.43	0.05	0.38	0.07	0.34	0.08
最小值	19.2	7.4	19.1	7.4	19.4	7.4	19.4	7.4	19.1	7.4	19.1	7.4
最大值	21.3	7.7	21.0	7.6	21.3	7.7	21.0	7.5	20.6	7.6	20.4	7.6

注: 同上差异为 2030 年代预测气象的平均值减去 2010 年代气象的平均值。直链淀粉含量和大米蛋白质含量的推测公式以及抽穗后 40 天期间的日平均累计气温根据表 4 和表 7。

表 12 根据 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象的各生育期气象推测的糙米白度和大米白度 (水稻栽培的 17 个地区平均)

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)				2030 年代预测气象							
	糙米白度		大米白度		CCSR				CGCM1			
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
平均值	18.8	19.1	37.8	37.7	18.9	19.1	37.7	37.6	19.4	19.6	38.1	38.0
(同上差异)	-	-	-	-	(0.1)	(0.0)	(-0.1)	(-0.1)	(0.6)	(0.5)	(0.3)	(0.3)
标准偏差	0.56	0.51	0.40	0.35	0.55	0.49	0.41	0.37	0.44	0.40	0.35	0.32
最小值	17.8	18.2	37.1	37.1	17.8	18.1	36.7	36.7	18.6	18.8	37.3	37.3
最大值	20.2	20.3	38.7	38.6	19.9	20.0	38.5	38.3	20.3	20.3	38.7	38.5

注: 同上差异为 2030 年代预测气象的平均值减去 2010 年代气象的平均值。糙米白度和大米白度的推测公式以及各生育期气象根据表 4 和表 7。

为+2.9~+3.4 百分点, 较高 (表 13)。增加的未熟粒为灌浆气温上升而发生的白未熟粒。与 2010 年代的受害粒比率 3.6%、4.5%之差, CCSR 为+1.1~+1.3 百分点, CGCM1 为-1.2~-0.8 百分点, 没有规律趋势。与 2010 年代的着色粒比率 0.11%、0.12%之差, CCSR 为+0.02~+0.03 百分点, CGCM1 为-0.05~-0.04 百分点, 也没有规律趋势。

综上所述, 2030 年代与 2010 年代相比, 大米蛋白质含量相同, 直链淀粉含量略低, 食味略好。受害粒和着色粒的发生没有一定的趋势, 未熟粒要略多。另外, 糙米白度略高, 大米白度相同。

近年, 在西南温暖地带白未熟粒发生较多而引起品质下降。根据至今的研究报告^[19-20], 如果抽穗后 20 天期间的平均气温超过 26~27 °C, 白未熟粒发生率变高从而使糙米等级下降。但是, 本文中的 2030 年代预测气象中, 灌浆气温变高的 CGCM1 (表 7) 其抽穗后 20 天期间的平均气温

在北海道中央部的深川市为 23.5 °C、旭川市为 22.5 °C、北海道南部的江差町为 23.3 °C、北斗市为 23.0 °C, 都比 26 °C 要低很多。因此, 在 2030 年代平常的气象条件下, 白未熟粒的发生使糙米等级下降的危险性低。但是, 有必要注意北海道的品种是在寒冷的北海道气象条件下选育的, 与日本东北以南的品种相比具有在低温地区发生白未熟粒的可能性。

2.5 稻瘟病的发生

在 2030 年代的 6-7 月份, 与 2010 年代的平均气温分别为 16.1、20.6 °C 相比, CCSR、CGCM1 分别上升了+0.2~+0.3 °C、+0.9 °C, 与 2010 年代的降水量 86、122 mm 相比分别为 1.21、1.54 倍, 增加了 1.20、1.38 倍。稻瘟病发生的适温为 20~25 °C, 降雨带来了稻瘟病菌发芽, 侵入所需的水滴有助其发生^[21]。因此, 稻瘟病发生时期会提前, 稻瘟病发生增加的风险可能无法避免。

表 13 根据 2010 年代气象以及 2030 年代预测气象的各生育期气象推测的糙米外观品质 (水稻栽培的 17 个地区平均) %

统计项目	2010 年代气象 (2010—2019 年平均)						2030 年代预测气象											
	未熟粒比率		受害粒比率		着色粒比率		CCSR		CGCM1		未熟粒比率		受害粒比率		着色粒比率			
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗		
平均值	11.1	11.9	3.6	4.5	0.11	0.12	11.3	12.0	4.7	5.8	0.13	0.15	14.0	15.3	2.5	3.7	0.07	0.09
(同上差异, 百分点)	-	-	-	-	-	-	(0.2)	(0.0)	(1.1)	(1.3)	(0.02)	(0.03)	(2.9)	(3.4)	(-1.2)	(-0.8)	(-0.05)	(-0.04)
标准偏差	3.01	3.53	1.91	1.76	0.06	0.06	2.53	2.81	2.30	2.11	0.07	0.06	3.69	3.75	1.75	1.86	0.05	0.05
最小值	9.2	9.3	0.0	0.5	0	0	9.2	9.3	0.6	1.9	0.00	0.03	9.4	10.0	0.0	0.0	0.00	0.00
最大值	21.5	23.4	7.0	7.5	0.22	0.22	18.1	19.3	10.3	11.0	0.30	0.30	22.4	23.3	7.2	8.3	0.20	0.22

注: 同上差异为 2030 年代预测气象的平均值减去 2010 年代气象的平均值。糙米外观品质的推测公式以及各生育期气象根据表 4 和表 7。

3 基于 2030 年代预测的技术应对方向

3.1 耐冷性

2030 年代与 2010 年代相比, 由于插秧日期和抽穗日期最早期限变早, 抽穗日期最晚期限变晚, 因此水稻安全抽穗期间变长, 延迟型冷害的危险性略低。但是, 春季的气温上升促进了水稻的生育, 同一成熟期的品种生育期提前, 冷害危险期的平均气温相同或略低, 依然有秕粒发生的风险。因此, 今后提高育成品种的障碍型耐冷性和深水灌溉等冷害对策技术依然很重要。为了避免生育提前而带来抽穗日期比抽穗日期最早期限早, 有必要对品种的早晚特性、秧苗的种类以及插秧日期进行适当的组合。

3.2 糙米产量和种植品种的成熟期

影响糙米产量的因素是从抽穗前 10 天开始到灌浆期间的日照量和障碍危险期的平均气温, 2030 年代的预测结果是和 2010 年代相同或有所下降。为了得到一定的产量, 需要确保到抽穗日期为止的营养成长期所需的每 m^2 稻谷粒数。从插秧到抽穗为止的期间越长越有利。由此, 包括 2030 年代为止的期间, 根据气候变化调整目前栽培品种的种植地带区分, 并对生育期间大幅度延长的地带, 明确确保产量的抽穗日期, 培育适合此成熟期的品种。

正如上述, 北海道水稻栽培地区的 2030 年代水稻栽培期间的平均气温 (5—9 月份的日平均累计气温) 与青森县靠太平洋一侧相同 (表 1)。从插秧到抽穗日期为止的期间 2010—2019 年平均是

北海道为 5 月 25 日—7 月 30 日, 青森县为 5 月 20 日—8 月 4 日, 青森县的插秧日期要早 5 天, 抽穗日期要晚 5 天 (表 3)。如果灌浆期没有大的差异, 青森县的生育期要长 10 天。此外, 青森县从抽穗前 10 天开始的 40 天期间日射量和北海道相同, 但糙米产量较高, 是北海道的 109% (表 9)。今后, 参考青森县的高产因素, 有必要明确北海道 2030 年代所需的高产技术。

3.3 食味及米粒外观品质

至今为止北海道的水稻育种目标是降低直链淀粉含量和大米蛋白质含量, 主要通过降低直链淀粉含量提高了食味^[22], 蛋白质含量的降低程度不大。一般来说, 抽穗晚的品种, 灌浆气温下降从而直链淀粉含量变高, 蛋白质含量变低^[4]。并且, 通过育种降低直链淀粉含量比较容易。因此, 2030 年代通过有效利用比现在要长的生育期, 种植比现在主要中稻品种成熟期晚而直链淀粉含量低的品种, 在此基础上降低蛋白质含量, 这样可以提高食味。

在米粒外观品质上, 预测糙米白度略有提高, 白未熟粒的发生会有增加。这不仅是受灌浆期的高温影响, 还由于生育初期的气温上升促进分蘖发生而使每 m^2 的稻谷数过剩, 引起每粒稻谷的灌浆期光合量不足从而增加白未熟粒发生的风险。因此, 适当施肥的同时, 当发生过剩分蘖时使用深水抑制分蘖^[23]。

目前北海道的粒厚选别机普遍使用 1.95 mm 筛网, 未完全成熟的颗粒作为次米被去掉, 从而提高了整糙米的外观品质^[24]。今后气候变暖使初

期生育变好, 齐穗性有所提高, 如果灌浆气温提高的话, 以往的未熟粒有可能成熟变为整粒。这样的话使用小一点的筛孔也可以确保外观品质, 有必要根据收获的粗糙米适当调整筛孔大小。

3.4 秧苗种类及施肥方法

至今为止北海道的生育期间有所限定, 为了稳定生产和生产优良食味大米促进初期生育很重要, 应提倡遵循标准的栽培密度, 秧苗使用比幼苗和中苗秧龄大的成苗, 进行侧条施肥等促进初期生育的方法。但维持高的栽培密度, 使用叶龄大的秧苗会增加育秧盘的数量, 并且育秧时间变长, 会增加生产者的育秧劳力和成本。春季气温的上升, 使用秧龄大的秧苗的话, 育秧大棚的高温会提高发生早期异常抽穗的风险^[25]。

东北地区中纬度高气象比较寒冷的青森县和秋田县与其它地区不同, 中苗和成苗比幼苗使用得多^[26]。所以, 2030 年代北海道初期生育的重要性不变, 在不影响稳定生产的范围内, 有必要考虑利用叶龄小的秧苗。

目前北海道基本上只施基肥, 但在生育期间长的时候, 促进初期生育会在营养成长期途中消耗大部分养分, 发生途中缺肥的可能性大, 今后进行分段施肥或利用缓效肥的可能性会增加。

3.5 耐稻瘟病的强化

关于稻瘟病发生增加的植保方法, 从 5-9 月份的累计气温来看, 实施如东北地区青森县采取的措施可以对应解决。但是, 日照量和降水量也会影响稻瘟病的发生, 需要注意这些因素的不同如何影响稻瘟病的发生。此外, 也要考虑能满足近年社会上对减少农药散布量需求的植保方法, 有必要培育和普及比以往更耐稻瘟病的品种。

3.6 其它

将来通过促进融雪有可能 5 月份的河川流量会减少^[27], 需要考虑到有些地区会有限制灌溉用水的可能性。

参考文献:

[1] 农林水产省大臣官房统计部编. 作况调查(水陆稻, 麦类, 豆类, 甘薯, 饲料作物, 经济农作物)[R]. 农林水产省统计情报

各领域分类/种植面积·生产量, 被害, 家畜的头数等 作物统计 (1996~2021). [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html\(2022/5/25 浏览\)](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kome/index.html(2022/5/25 浏览)).

[2] HAYASE H, SATAKE T, NISHIYAMA I, et al. Male sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage in rice plants. II The most sensitive stage to cooling and fertilizing ability of pistils[J]. Proc. Crop Sci. Soc. Japan, 1969, 38: 706-711.

[3] 稻津脩. 通过提高北海道产米的食味改善品质的研究[R]. 北海道立农业试验场报告, 1988, 66: 1-89.

[4] 菊地治己. 稻米胚乳成分的育种学研究[R]. 北海道立农业试验场报告, 1988, 68: 1-68.

[5] 丹野久. 日本寒冷地带北海道大米蛋白质和直链淀粉含量的年度与地区间差异及其影响因素[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 57-65.

[6] 五十岚俊成. 高温年份的大米「腹白」「乳白」等的发生[J]. 农家之友, 2014, 66(1): 41-43.

[7] 北海道, 北海道米麦改良协会. 水稻各地带栽培指标手册. 北海道的稻作「水稻各地带栽培指标手册」, 「优质米稳定生产技术」[M]. 札幌: 北海道米麦改良协会, 1989: 1-91.

[8] 竹川昌和. 基于气象条件的各地带水稻品种选定基准—关于地域气象观测系统的区域网格—[N]. 北海道立农试集报, 1991, 63: 41-52.

[9] 林阳生, 石乡冈康史, 横泽正幸, 等. 温暖化对日本水稻栽培的潜在特性影响[J]. 地球环境, 2001, 6 (2): 141-148.

[10] 丹野久. 日本寒冷地带北海道梗稻米粒外观品质的年度及地域间差异及其发生原因[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 75-85.

[11] 中辻敏朗. 温暖化气候数据的维护. 北海道立综合研究机构农业研究本部中央农业试验场志贺弘行·中辻敏朗编, 战略研究「构筑能对应地球温暖化和生产构造变化的北海道农林业—气象变动对道内主要作物的影响预测—」成果集平成 23 年 10 月[R]. 北海道立综合研究机构农业试验场资料, 2011, 39: 2-6.

[12] 丹野久. 地球温暖化对道内主要作物的影响及其对应方向(2030 年代的预测) 2. 水稻的影响预测[J]. 北农, 2012, 79(1): 72-81.

[13] 北海道农政部 生产振兴局农产振兴课编. 有关稻米的资料[生产·价格·需求](令和 3 年 11 月)[R]. 北海道农政部生产振兴局农产振兴课 kome 北海道的水田农业(2021). [https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/nsk/kome/index3.html\(2022/5/20 浏览\)](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/nsk/kome/index3.html(2022/5/20 浏览)).

[14] YOKOZAWA M, GOTO S, HAYASHI Y, et al. Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO₂ concentration[J]. J. Agric. Meteorol., 2003, 59: 117-130.

[15] 镰田金英治, 福田兼四郎. 从农业气象来看秋田县的水稻地带区分和冷害危险程度·安全稻作时期[N]. 秋田县农试研报, 1983, 25: 33-57.

[16] 北海道立中央农业试验场, 上川农业试验场. 水稻的发育阶段以及秕粒率的推定法[R]. 北海道立综合研究机构农业研究本部 农业技术情报广场北海道农业试验场试验研究一览(1997). <https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/>

- seikajoho/h09s_joho/h0900022.htm(2022/6/3 浏览).
- [17] 堀江武, 中川博视. 水稻发育过程的模型化和预测的研究第 1 报模型的基本构造和参数推定法以及抽穗预测的应用[J]. 日作纪, 1990, 59(4): 687-695.
- [18] 村田吉男. 日射和温度对我国水稻产量地域性的影响[J]. 日作纪, 1964, 33(1): 59-63.
- [19] 若松谦一, 佐佐木修, 上菌一郎, 等. 暖地水稻灌浆期间的高温对糙米品质的影响[J]. 日作纪, 2007, 76(1): 71-78.
- [20] 森田敏. 水稻高温灌浆障碍的克服[J]. 日作纪, 2008, 77(1): 1-12.
- [21] 大畑贯一. 稻瘟病. 水稻病害—诊断·生态·植保—[M]. 东京: 全国农村教育协会, 1989: 295-356.
- [22] 沼尾吉则. 关于北海道水稻的优良食味品种育成[J]. 北农, 2009, 76(3): 336-342.
- [23] 北海道立中央农业试验场, 上川农业试验场. 「闪光 397」的栽培特性[R]. 北海道立综合研究机构农业技术情报广场北海道农业试验场试验研究成果一览(1992). <https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h04gaiyo/1991001.htm>(2022/5/25 浏览).
- [24] 川村周三. 通过稻米收获后技术提高品质·食味. 松江勇次编著, 稻米的外观品质·食味—最新研究和改善技术—[M]. 东京: 养贤堂, 2018: 393-417.
- [25] 北海道立综合研究机构上川农业试验场, 中央农业试验场. 使用成苗钵秧抑制早期异常抽穗的技术[R]. 北海道立综合研究机构农业技术情报广场北海道农业试验场试验研究成果一览(2014). <http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/26/f1/12.pdf>(2022/5/22 浏览).
- [26] 藤井薰. 寒地(东北·靠太平洋一侧)的育苗模式. 农文协编, 稻作大百科Ⅳ栽培模式/管理的实际[M]. 东京: 农山渔村文化协会, 1990: 25-38.
- [27] 井上聪, 横山宏太郎, 大野宏之, 等. 地球温暖化使国内降雪量减少时对河川的影响[J]. 地球环境, 2001, 6(2): 259-266. 完
- 日译中: 河野元信(日本株式会社佐竹)