



海南岛水稻需水量与缺水量的时空变化特征

邹海平, 张京红, 李伟光, 陈小敏, 白 蕤, 吕 润

(海南省气候中心/海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203)

摘要: 为了掌握海南岛水稻需水量和缺水量的时空变化特征, 基于海南岛 18 个市(县)1971—2020 年的逐日气象数据和 6 个农业气象试验站早、晚稻生育期数据, 采用 Penman-Monteith 公式和作物系数法及美国农业部土壤保持局推荐的方法计算早、晚稻需水量和缺水量, 并分析其时空变化特征。结果表明: 近 50 年海南岛早、晚稻全生育期需水量分别为 444.9、419.7 mm, 全生育期缺水量分别为 337.1、186.9 mm。早、晚稻全生育期需水量和缺水量空间分布各异。所有市(县)早、晚稻全生育期均缺水, 缺水量主要分布在拔节孕穗期和分蘖前期。近 50 年海南岛早、晚全生育期需水量和缺水量多数市(县)(占比为 55.6%~66.7%)呈减少趋势且以不显著减少为主, 对海南岛水稻种植总体有利。但海口市、东方市、临高县、白沙县、琼中县和定安县早稻全生育期缺水量, 东方市、昌江县、白沙县、琼中县、定安县、琼海市、文昌市和乐东县晚稻全生育期缺水量在增加, 需加强稻田用水管理。

关键词: 水稻; 需水量; 作物系数; 有效降水量; 缺水量; 海南岛

中图分类号: P49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2023)05-0569-08

邹海平, 张京红, 李伟光, 等. 海南岛水稻需水量与缺水量的时空变化特征 [J]. 热带生物学报, 2023, 14(5): 569-576. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20230074

水稻(*Oryza sativa*)是海南岛最主要的粮食作物, 近几年播种面积都维持在 24 万 hm^2 左右, 约占粮食作物的 86%^[1]。海南稻米直链淀粉含量高达 26%, 符合当地居民饮食习惯要求, 深受百姓喜爱^[2]。水资源作为限制农业发展的重要因素之一, 是农业生产中最重要的资源支撑和保证, 与农业生产和粮食安全息息相关^[3]。海南岛年均降水量为 1 826.0 mm, 水资源丰富, 但时空分布不均、干旱频发, 且农田灌溉用水量利用率低仅为 55.3%, 对水稻稳产高产造成直接影响^[4-6]。作物需水量与缺水量是进行农业水资源分配、农业水利工程设计的重要参考指标^[7]。全球气候变暖以及随之改变的降水时空格局将会直接影响作物生长发育和耗水过程, 进而影响作物需水量和缺水量^[8]。因此, 掌握海南岛水稻需水量和缺水量的时空变化特征, 对海南岛合理进行水资源配置、提高农田灌溉用水利用率、保障水稻科学高效生产具有重要

的指导和实践意义。近年来, 国内外诸多学者对水稻^[9-15]、玉米(*Zea mays*)^[16-17]、小麦(*Triticum aestivum*)^[7,18]、棉花(*Gossypium spp*)^[19-20]、大豆(*Glycine max*)^[21-22]、马铃薯(*Solanum tuberosum*)^[23]、花生(*Arachis hypogaea*)^[24]和烤烟(*Nicotiana tabacum*)^[25]等不同作物需水量和缺水量的时空特征开展了大量的研究。在研究方法上, 主要利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和作物系数法计算作物需水量, 该方法考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制, 具有很好的物理基础^[26]。缺水量为需水量与同时期有效降水量之差^[27], 有效降水量的计算主要采用美国农业部土壤保持局推荐的方法, 该方法是目前众多的有效降水计算方法中得到公认和普遍推广的方法之一, 其有效性已在许多学者的研究中予以证明^[28-29]。刘钰^[9]等分析了中国水稻需水量和缺水量的空间分布特征, 其选用的海南岛气象站仅有 1 个, 在揭

收稿日期: 2023-05-25

修回日期: 2023-06-19

基金项目: 海南省自然科学基金项目(417300); 国家重点研发计划课题(2019YFD1002203)

第一作者: 邹海平(1987-), 男, 硕士, 高级工程师. 研究方向: 农业气象. E-mail: google2456@163.com

示海南岛水稻需水和缺水量规律方面不够细致全面,且计算水稻需水量的作物系数为修订后的FAO推荐值,与实际作物系数值存在一定误差。因此,本研究基于海南岛18个市(县)1971—2020年的逐日气象数据和6个农业气象试验站水稻生育期数据,采用Penman-Monteith公式和海南水稻作物系数实际值计算水稻需水量,结合美国农业部土壤保持局推荐的方法计算水稻有效降水量,进而得到水稻缺水量。再结合数理统计方法和GIS插值技术对海南岛水稻需水量和缺水量的时空变化特征进行分析,旨在为海南岛农业发展和农业水资源合理分配提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源 气象资料来自海南省气象信息中心,包括海南岛18个市(县)1971—2020年的逐日平均最高、最低气温,日照时数,平均风速,水汽压,气压,经纬度和海拔高度。水稻(早、晚稻)生育期数据来自6个农业气象观测站,分别分布在海口市、琼海市、陵水县、儋州市、乐东县和琼中县。各市(县)生育期观测开始时间不同,为保持一致,起止年限统一选为1999—2020年。

表1 海南岛水稻各生育阶段作物系数(K_c)

类别	移栽返青期	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
早稻	1.12	1.18	1.13	1.35	1.44	1.25	1.05
晚稻	1.03	1.20	1.07	1.32	1.43	1.22	0.93

1.2.3 有效降水量计算 有效降水量是指能够提供给作物蒸发蒸腾,从而减少作物对灌溉水需求的雨量^[9],采用美国农业部土壤保持局推荐的方法^[15,28]进行逐日计算,公式为:

$$P_e = \sum_{i=1}^N P_{ei} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{P_i(4.17 - 0.2P_i)}{4.17} & (P_i < 8.3), \\ \sum_{i=1}^N P_i(4.17 + 0.2P_i) & (P_i \geq 8.3), \end{cases}$$

式中, P_e 为某生育阶段有效降水量(mm); P_{ei} 为日有效降水量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); P_i 为日降水量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。

1.2.4 缺水量计算 缺水量计算公式为:

$$D_w = ET_c - P_e,$$

式中, D_w 为某生育阶段缺水量(mm)。 $D_w > 0$,表示该生育阶段作物缺水; $D_w = 0$,表示水分供需平衡;

1.2 研究方法

1.2.1 生育期确定 水稻全生育期是指水稻移栽至收获整个时期,将水稻全生育期划分为移栽返青期、分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期7个阶段,各生育期出现时间按多年实测平均值确定。无生育期观测资料的市(县),根据海南气候区划结果^[5]采用其邻近的农业气象观测站数据,具体划分情况为:海口市、定安县、澄迈县、屯昌县;琼海市、文昌市、万宁市;陵水县、保亭县、三亚市;儋州市、临高县;乐东县、昌江县、东方市;琼中县、白沙县、五指山市。

1.2.2 需水量计算 水稻需水量采用参考作物蒸散量和作物系数法^[26]进行逐日计算,各生育阶段的需水量由生育阶段内逐日需水量累加得出:

$$ET_c = \sum_{i=1}^N ET_{ci} = \sum_{i=1}^N K_c \times ET_{0i},$$

式中, ET_c 为某生育阶段需水量(mm); ET_{ci} 为日需水量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); i 为生育阶段日数(d); K_c 为作物系数; ET_{0i} 为日参考作物蒸散量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。 K_c 与作物生育阶段有关,不同发育阶段 K_c 不同。本研究采用海南水稻 K_c 试验结果值(表1)^[29]。 ET_{0i} 采用Penman-Monteith公式计算^[26]。

$D_w < 0$,表示水分盈余。

1.2.5 其他方法 利用Excel2007,采用线性回归方法对水稻 ET_c 和 D_w 进行时间序列分析,用回归系数的10倍^[10]表征其变化方向和程度,并采用F检验法对拟合方程进行显著性检验($\alpha=0.05$)。采用ArcGIS9.3软件中的反距离权重方法对水稻 ET_c 和 D_w 进行插值,得到相应的空间分布图,并采用自然断点法进行等级划分,栅格大小为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 。

2 结果与分析

2.1 水稻全生育期需水量和缺水量空间分布 海南岛18市(县)早稻全生育期50年平均需水量和缺水量分别为 $342.5 \sim 531.0\text{ mm}$ 和 $241.8 \sim$

量之和占各自全生育期 50 年平均需水量的比例为 57.6%~70.0%，均值为 64.8% 大于 50%。可见，整体上海南岛早稻全生育期需水量主要分布在拔节孕穗期、分蘖前期和黄熟期。18 市(县)早稻 7 个生育阶段 50 年平均缺水均 >0(图 1-b)，说明 18 市(县)早稻 7 个生育阶段均缺水。18 市(县)拔节孕穗期 50 a 平均缺水均大于各自其余 6 个生育阶段缺水，均值为 103.3 mm；18 市(县)分蘖前期缺水均值为 69.6 mm，其中 16 市(县)分蘖前期缺水仅次于各自拔节孕穗期缺水。18 市(县)早稻拔节孕穗期和分蘖前期 50 年平均缺水之和占各自全生育期 50 年平均缺水的比例为 44.4%~59.7%，均值为 51.4%。可见，整体上海南岛早稻全生育期缺水主要分布在拔节孕穗期和分蘖前期。

晚稻全生育期需水量和缺水时间分布情况与早稻较相似。整体而言，晚稻全生育期需水量

主要分布在拔节孕穗期和分蘖前期，18 市(县)晚稻此二生育阶段 50 年平均需水量之和占各自全生育期 50 年平均需水量的比例为 48.0%~57.6%，均值为 53.2%(图 1-c)；缺水方面，18 市(县)除琼中县晚稻乳熟期、黄熟期，屯昌县晚稻黄熟期和保亭县晚稻黄熟期缺水 <0 外，其余生育阶段缺水 >0(图 1-d)。整体上晚稻全生育期缺水主要分别在拔节孕穗期和分蘖前期，18 市(县)晚稻此二生育阶段 50 年平均缺水之和占各自全生育期 50 年平均缺水的比例为 44.8%~76.3%，均值为 60.2%。

2.3 水稻全生育期及各生育阶段需水量、缺水变化趋势 近 50 年 18 市(县)早、晚稻全生育期及 7 个生育阶段的需水量和缺水变化趋势见表 2。可看出，早稻全生育期需水量和缺水呈减少趋势的市(县)个数分别为 10 和 12，占有所有市(县)的比例分别为 55.6% 和 66.7%，其中减少显著

表 2 1971—2020 年海南岛 18 市(县)早、晚稻全生育期及各生育阶段的需水量、缺水变化趋势

市(县)	早稻		晚稻	
	需水量	缺水	需水量	缺水
海口市	▽△△△△▲▲△	▽△△△△△△△	△▽▽▲▽▲△△	△▽▽△▽△▽▽
东方市	▽△△△△▽△▲	▽△△△△▽△▲	▼△△△△▽▲△	▽▽△△△▽△△
临高县	▽△▽▽▽△△△	▽△▽△▽△▽△	▽▽△△▽▽△▽	▽▼△△▽▽△▽
澄迈县	▼▼▽▽▼▼▼▼	▼▽▽▽▼▽▽▼	▽▼▽▽▽△▼▼	▽▼▽▽▽△▽▼
儋州市	▽△▽▽▽△△▽	▽△▽▽▽△▽▽	▽▽△△▽▽△▽	▽▼△△△▽△▽
昌江县	▽▽△△▽▽△▽	▽▽▽△▽▽△▽	▽△△▽△▽△▽	▽▽△▽▽▽△△
白沙县	▽△△△▽△△△	▽△△△▽▽△△	△▽△△△△△△	△▽△▽△▽△△
琼中县	△△△▲△△▲▲	△△△△▽△△△	△△▲▲▲▲▲▲	△△△△△△△▲
定安县	▽△△△△▲▲△	▽△△△△△▲▲	△▽▽▲▽▲△△	▽▽▽△▽△▽△
屯昌县	▽▽▽▽▽△▽▽	▽▽▽▽▽△△▽	△▼▽△▽△▽▽	▽▼▽▽▽△▽▽
琼海市	▽▽▽▽▽△▽▽	▽▽▽▽△△▽▽	▲△△▽△△△△	▲△△▽△△△△
文昌市	▽▽▽▽▽△▽▽	▽▽▽▽△▽▽▽	▲△▽▽▽△△▽	▲△▽▽△△△△
乐东县	▼▽▽▽▽▽▽▼	▽▽▽▽▽▽▽▽	▽▽△▽▽▽▽▽	▽△△△▽▽△△
五指山市	▽▽▽▽▽▽▽▼	▽▽▽▽▽△▽▽	▽▽▽▽△▽▽▽	▽▼▽▽△▽△▽
保亭县	▽△▽▽△△▽△	△△▽▽▽△▽▽	▽▼△△▽△▽▽	▽▼△△▽△▽▽
三亚市	▼▼▼▼▼▼▼▼	▼▼▼▼▼▼▼▼	▼▼▽▽▼▽▼▼	▽▼▽▽▽▽▽▼
万宁市	▽▽▽▽▽△▽▽	▽▽▽▽△▽▽▽	△△▽▼△△△▽	△▽▽▼△△△▽
陵水县	▽△▽▽△△▽△	△▽▽▽△△▽▽	▽▼△△▽△▽▽	▽▼△△▽△▽▽

注：符号从左至右依次为移栽返青期、分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、黄熟期和全生育期。▲、▼分别表示显著增加、减少(P<0.05)，△、▽分别表示不显著增加、减少。

的市(县)个数分别为4和1,说明早稻全生育期需水量和缺水量多数市(县)(占比>50%,下同)呈减少趋势且以不显著减少为主。早稻全生育期缺水量呈增加趋势的市(县)包括海口市、东方市、临高县、白沙县、琼中县和定安县。7个生育阶段中,早稻移栽返青期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期和黄熟期5个生育阶段需水量多数市(县)(占比分别为94.4%、66.7%、66.7%、66.7%、55.6%)亦呈减少趋势且以不显著减少为主;乳熟期需水量情形相反,即多数市(县)(占比为66.7%)呈增加趋势且以不显著增加为主;分蘖前期需水量情形居中,各有一半市(县)呈增加、减少趋势且以不显著变化为主。缺水量方面,除早稻乳熟期缺水量各有一半市(县)呈增加、减少趋势外,其余生育阶段缺水量多数市(县)(占比为55.6%~83.3%)呈减少趋势且以不显著减少为主。

晚稻全生育期需水量和缺水量多数市(县)(占比为66.7%和55.6%)亦呈减少趋势且以不显著减少为主。晚稻全生育期缺水量呈增加趋势的市(县)包括东方市、昌江县、白沙县、琼中县、定安

县、琼海市、文昌市和乐东县。7个生育阶段中,晚稻移栽返青期、分蘖前期和抽穗开花期3个生育阶段需水量多数市(县)(占比分别为55.6%、66.7%和61.1%)呈减少趋势且以不显著减少为主,其余生育阶段需水量多数市(县)呈增加趋势且以不显著增加为主。晚稻移栽返青期、分蘖前期、拔节孕穗期和抽穗开花期4个生育阶段缺水量多数市(县)呈减少趋势,其中仅分蘖前期以显著减少为主,分蘖后期、乳熟期和黄熟期缺水量多数市(县)呈增加趋势且以不显著增加为主。

18市(县)早稻全生育期及各生育阶段缺水量每10年的变化量见表3。*表示某市(县)7个生育阶段中,缺水量每10年的变化量与全生育期缺水量每10年的变化量符号一致且绝对值最大的那个。以儋州市为例,其全生育期缺水量每10年的变化量为-3.3 mm,7个生育阶段中缺水量每10年的变化量为负值且绝对值最大的为拔节孕穗期缺水量(每10年的变化量为-1.7 mm)。通过统计发现,*落在早稻移栽返青期至黄熟期7个生育阶段的个数分别为0、4、0、7、2、0、5,拔节孕穗期和黄

表3 1971—2020年海南岛18市(县)早稻全生育期及各生育阶段缺水量每10a的变化量

mm

市(县)	移栽返青期	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
海口市	-0.5	3.0*	0.2	1.4	0.5	2.0	1.1	7.7
东方市	-0.1	1.9	1.7	4.7*	0.8	-0.5	3.3	11.6
临高县	-0.9	1.6*	-0.4	1.5	-0.8	0.5	-0.1	1.5
澄迈县	-2.1	-3.8	-2.0	-2.6	-4.0*	-1.3	-2.9	-18.7
儋州市	-1.0	0.0	-1.2	-1.7*	0.0	0.9	-0.4	-3.3
昌江县	-0.5	-1.9*	0.0	0.2	-1.5	-0.1	3.3	-0.6
白沙县	-0.1	1.2	0.1	0.0	-1.0	-0.8	2.3*	1.7
琼中县	0.4	3.2	0.5	4.3*	-0.5	0.8	2.7	11.4
定安县	-0.8	1.6	0.5	1.2	0.9	2.3	5.2*	10.9
屯昌县	-1.1	-0.3	-0.9	-1.5	-1.7*	1.5	0.1	-3.9
琼海市	-0.5	-1.5	-0.9	-2.4*	0.4	0.7	-2.2	-6.5
文昌市	-0.4	-1.2	-0.4	-2.1*	0.1	-0.4	-1.4	-5.8
乐东县	-0.5	-1.8*	-0.8	-0.7	-1.3	-0.4	-0.9	-6.6
五指山市	-0.2	-1.2	-1.6	-2.8*	-1.3	-0.1	0.2	-6.9
保亭县	0.2	1.6	-0.6	-0.9	-0.6	1.1	-2.6*	-1.8
三亚市	-1.7	-6.3	-4.7	-9.7*	-4.6	-3.7	-4.3	-35.0
万宁市	-0.7	-1.9	-0.7	-2.9	1.6	0.0	-3.4*	-8.1
陵水县	0.2	-0.3	-0.2	-0.4	0.6	0.1	-0.4*	-0.3

熟期*个数最多和次多,二者*个数之和占*总个数的比例超过 50.0% 为 66.7%,可见总体上海南岛早稻拔节孕穗期或黄熟期缺水变化是引起全生育期缺水变化的最主要原因。以此类推,总体上海南岛早稻拔节孕穗期或分蘖前期(*个数均为 7)需水量变化是引起全生育期需水量变化的最主要原因。海南岛晚稻全生育期需水量和缺水变化最主要原因分别与早稻全生育期需水量和缺水一致。

3 讨论

1971—2020 年海南岛早、晚稻全生育期需水量分别为 444.9、419.7 mm,全生育期缺水分别为 337.1、186.9 mm。陈玉民等^[30]实测 1981—1988 年琼海市早、晚稻全生育期需水量分别为 467.8、466.2 mm,本研究计算得出相应时段需水量分别为 436.1、469.5 mm,可见计算值与实测值接近,说明笔者采用 Penman-Monteith 公式和海南水稻作物系数实际值计算水稻需水量可行。早、晚稻全生育期缺水相差较大,是由早、晚稻有效降水量相差较大引起。而早、晚稻有效降水量相差较大是因为晚稻大部分生育时段处于海南岛汛期(5~10月)^[4]、降水充沛,而早稻大部分时段处于非汛期、降水较少。早、晚稻全生育期需水量和缺水空间分布各异。

整体而言,海南岛早稻全生育期需水量主要分布在拔节孕穗期、分蘖前期和黄熟期,晚稻全生育期需水量主要分布在拔节孕穗期和分蘖前期,符合水稻需水规律^[30]。所有市(县)早、晚稻全生育期均缺水,缺水主要分布在拔节孕穗期和分蘖前期。所有市(县)早稻 7 个生育阶段均缺水,晚稻除 4 个市(县)少数生育阶段不缺水外,其余生育阶段均缺水。

1971—2020 年海南岛早、晚稻全生育期需水量和缺水多数市(县)(占比为 55.6%~66.7%)呈减少趋势且以不显著减少为主。近 50 年海南岛早、晚稻 7 个生育阶段需水量和缺水变化趋势情形各异。早、晚稻拔节孕穗期或分蘖前期需水量变化是引起其全生育期需水量变化的最主要原因,拔节孕穗期或黄熟期缺水变化是引起全生育期缺水变化的最主要原因。早、晚稻全生育期缺水多数市(县)在减少,水稻灌溉量相应减

少,对海南岛水稻种植总体有利。但海口市、东方市、临高县、白沙县、琼中县和定安县早稻全生育期缺水,东方市、昌江县、白沙县、琼中县、定安县、琼海市、文昌市和乐东县晚稻全生育期缺水在增加,水稻灌溉量相应增加,上述地区需加强稻田节水灌溉管理,确保水资源高效利用。

影响水稻需水量的因素,除气象因素外,非气象因素(如水稻品种、土壤类型、施肥水平、灌溉方式)对水稻需水量亦会产生一定影响^[13,30]。海南岛各地水稻非气象因素存在一定的差异,本研究在计算水稻需水量时对非气象因素的影响考虑不足,有待后续研究完善。

参考文献:

- [1] 海南省统计局,国家统计局海南调查总队. 海南统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 243.
- [2] 唐清洁, 严小微, 孟卫东. 海南水稻生产现状分析及发展对策[J]. 杂交水稻, 2015, 30(1): 1-5.
- [3] 吕军, 孙嗣阳, 陈丁江. 气候变化对我国农业旱涝灾害的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1713-1719.
- [4] 王春乙. 海南气候[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 18-19.
- [5] 温克刚. 中国气象灾害大典: 海南卷[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 121-157.
- [6] 徐磊磊, 刘海清, 金琰, 等. 海南省水资源开发利用特点及主要水资源问题[J]. 热带农业科学, 2017, 37(9): 120-127.
- [7] 张华, 王浩. 1967—2017 年甘肃省小麦需水量和缺水时空特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1094-1104.
- [8] 丛振涛, 辛儒, 姚本智, 等. 基于 HadCM3 模式的气候变化下北京地区冬小麦耗水研究[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1101-1107.
- [9] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
- [10] 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.
- [11] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960—2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 279-290.
- [12] 张波, 谷晓平, 古书鸿, 等. 贵州水稻有效降水量和需水量特征分析[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(2): 191-199.
- [13] 曹言, 王杰, 王树鹏, 等. 气候变化下滇中地区水稻需水量与灌溉需水指数时空变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 226-235.
- [14] KUMAR S. Reference evapotranspiration (ET₀) and irrigation water requirement of different crops in Bihar [J]. *Journal of Agrometeorology*, 2017, 19(3): 238-

- 241.
- [15] DóLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1-8.
- [16] 刘行, 张晓龙, 王艺璇, 等. 1960—2018年中国玉米生育期及各生育阶段水热条件时空变化特征[J]. 2021, 29(8): 1417-1429.
- [17] 张华, 王浩, 徐存刚. 1967—2017年甘肃省玉米需水量与缺水量时空分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1718-1730.
- [18] 环海军, 杨再强, 刘岩, 等. 鲁中地区冬小麦水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2016, 34(5): 866-872.
- [19] 刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 98-104.
- [20] 卡力比尔·买买提, 巴特尔·巴克, 祁嘉郁. 北疆地区棉花生育期需水量变化特征及成因分析[J]. *节水灌溉*, 2021(1): 81-85.
- [21] 姜浩, 聂堂哲, 陈鹏, 等. 基于CROPWAT模型的大豆需水量及灌溉制度研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(11): 211-217.
- [22] 李玖颖, 王欣亮, 王忠波, 等. 黑龙江省近50年大豆需水量与干旱时空分布特征研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 223-237.
- [23] 马凤莲, 温永菁, 李春强, 等. 冀北地区近50a马铃薯需水量及水分盈亏时空变化特征[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(5): 713-723.
- [24] 张建涛, 李国强, 藏贺藏, 等. 河南省夏花生水分供需变化及时空分布特征[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(10): 2384-2392.
- [25] 张波, 裴兴云, 曹华, 等. 贵州烤烟需水量及灌溉需求指数特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 215-221.
- [26] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements- FAO Irrigation and drainage Paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37-58.
- [27] BROUWER C, HEIBLOEM M. Irrigation water management: Irrigation water needs, irrigation water management training manual No. 3[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986: 63-68.
- [28] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management (FAO irrigation and drainage paper 46)[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [29] 于艳青. 三亚市大隆灌区水稻灌溉制度设计[J]. *安徽农学通报*, 2018, 24(8): 124-125.
- [30] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 104-115.

Spatial and temporal variations of water requirement and water deficit of rice in Hainan Island

ZOU Haiping, ZHANG Jinghong, LI Weiguang, CHEN Xiaomin, BAI Rui, LYU Run

(Hainan Climate Center/Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: An attempt was made to grasp the spatial and temporal variation of water requirement and water deficit of rice in Hainan Island. Based on the daily meteorological data from 18 cities/counties in Hainan Island from 1971 to 2020 and the growth period data of early and late rice from 6 agro-meteorological stations in Hainan Island, the water requirement and deficit of early and late rice were calculated by using Penman-Monteith formula, crop coefficient method and the method recommended by the Soil Conservation Service of the United States Department of Agriculture, and their spatial-temporal variations were analyzed. The results showed that in the past 50 years the water requirements during the whole growth period of early and late rice in Hainan Island were 444.9 mm and 419.7 mm, respectively, while the water deficits during the whole growth period were 337.1 mm and 186.9 mm, respectively. The spatial distribution of water requirements and deficits during the whole growth period of early and late rice varied. All cities/counties were short of water during the whole growth period of early and late rice, and the water shortage was mainly distributed in the jointing-booting stage and pre-tillering stage. In recent 50 years the water requirement and water deficit during the whole growth period of early and late rice showed a decreasing trend and was mainly not significantly reduced at most cities/counties (accounting for 55.6 % ~ 66.7%), which was generally beneficial to the rice cultivation in Hainan Island. However, the early rice was deficit of water during the whole growth period in Haikou, Dongfang, Lingao, Baisha, Qiongzong and Dingan, and the late rice tended to increase its water deficit in Dongfang, Changjiang, Baisha, Qiongzong, Dingan, Qionghai, Wenchang and Ledong, indicating the need to strengthen water management in paddy fields.

Keywords: rice; water requirement; crop coefficient; effective precipitation; water deficit; Hainan Island

(责任编辑:潘学峰)