文章编号:1000-7601(2020)05-0226-10

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.05.32

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

曹 言,王 杰,王树鹏,黄 英,张 雷,李尤亮

(云南省水利水电科学研究院,云南 昆明 650228)

摘 要:基于 1961—2013 年滇中地区 48 个气象站逐日气象数据和 2014—2018 年 5 个水稻灌溉试验站的水稻 生育期观测资料,利用 Penman-Monteith 公式和单作物系数法,并结合线性趋势和 Mann-Kendall 法计算分析了近 53 a 滇中不同分区水稻不同生育期需水量(ET_e)、有效降雨量(P_e)、净灌溉需水(IR)和灌溉需水指数(IRI)的时空分 布特征。结果表明:1961—2013 年滇中地区 ET_e、P_e、IR 和 IRI 平均值分别为 546.34、235.96、310.38 mm 和 0.57, ET_e和 P_e均呈显著减少趋势, IR 和 IRI 呈波动上升趋势,每 10 a 其变化幅度分别为-4.358、-6.468、1.2 mm 和 0.8%。ET_e減 小趋势主要集中在滇中 I-2 区和干热河谷 VI 区, P_e减小趋势主要集中在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区, IRI 上升趋势主要 集中在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区, ET_e、P_e和 IRI 显著变化主要出现在拔节孕穗期、分蘖期和乳熟期。1961—2013 年 滇中水稻 ET_e呈分蘖期>抽穗开花期>乳熟期>拔节孕穗期>返青期>黄熟期, P_e呈抽穗开花期。滇中水稻不同生育期 彩期>返青期>黄熟期, IRI 呈返青期>分蘖期>黄熟期>乳熟期>拔节孕穗期>抽穗开花期。滇中水稻不同生育期 ET_e呈现中北高中东低, 减小幅度高值区主要分布在中北部,上升幅度高值区主要分布在中东部, P_e和 IRI 则呈相反 的变化特征。P_e是影响 ET_e、IR 和 IRI 变化的主导因素。

关键词:水稻;需水量;灌溉需水指数;时空变化;滇中地区 中图分类号:S511;S165⁺.22 文献标志码:A

Temporal and spatial variation analysis of water and irrigation requirement index of rice in central Yunnan Province under climate change

CAO Yan, WANG Jie, WANG Shupeng, HUANG Ying, ZHANG Lei, LI Youliang

(Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming, Yunnan 650228, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 48 meteorological stations during 1961–2013 and rice growth observation data from 5 rice irrigation experimental stations during 2014–2018 in the central Yunnan Province, the crop water requirement (ET_c) , effective precipitation (P_e) , irrigation requirement (IR), and irrigation requirement index (IRI) in the central Yunnan Province with 53 years (1961–2013) were calculated by using the Penman–Monteith equation and single crop coefficient method, the temporal and spatial variation of ET_c , P_e , IR, and IRI during rice growth season in different regions were analyzed by the linear trend estimate and M–K method. The results showed that the average ET_c , P_e , IR, and IRI during rice growth season were 546.34 mm, 235.96 mm, 310.38 mm, and 0.57, respectively. The ET_c and P_e significant decreased with a decreasing rate of 4.358 mm \cdot decade⁻¹ and 6.468 mm \cdot decade⁻¹. The IR and IRI had increased with an increasing rate of 1.2 mm \cdot decade⁻¹ and 0.8% \cdot decade⁻¹. The ET_c decreased mainly in Dianzhong I–2 and Xerothermal valley VI. The P_e decreased mainly in Dianzhong I–3 and Dianzhong I–4, and the increased IRI mainly in Dianzhong I–3 and Dianzhong I–4, were mainly occurred in the heading flowering, tillering, and milk stages. The ET_c of rice in the central Yunnan Province from 1961 to 2013 was represented as tillering stage > heading flowering stage > milk stage > jointing booting stage > returning green stage > yellow ripening stage. The P_e was ranked

基金项目:云南省重点新产品开发计划项目(2015BB019);云南省省级水资源费项目(201903)

作者简介:曹言(1987-),男,陕西鄠邑区人,工程师,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail:359851137@qq.com

通信作者:王杰(1979-),男,甘肃静宁人,正高级工程师,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail:547211394@qq.com

收稿日期:2019-10-24 修回日期:2020-08-11

as heading flowering stage >tillering stage >jointing booting stage >milk stage > returning green stage > yellow ripening stage. The *IRI* was ranked as returning green stage >tillering stage > yellow ripening stage>milk stage >jointing booting stage >heading flowering stage. The ET_c showed high value in the north central region and the low value in the east central region in different growth periods of the rice. The areas with great decrease of ET_c in the different growth periods of the rice was mainly concentrated in the north central region, and the areas with great increase of ET_c was mainly concentrated in the east central region. The P_e and *IRI* had the opposite characteristics. The most positive and negative correlation factors for ET_c , IR, and *IRI* of rice was P_e .

Keywords: rice; water requirement; irrigation water requirement index; spatial and temporal variability; central Yunnan Province

云南省地处云贵高原,气候类型多样、地形地 貌和土壤类型复杂,是我国水稻种植大省,种植历 史悠久,且分布广泛^[1]。滇中地区是云南省农业生 产最发达的地区,也是云南省水稻主产区,水稻种 植面积和产量占全省的 70%^[2]。由于气候变化、作 物生长期空间分布差异较大,导致了滇中水稻水分 供需时空差异较大^[3-4]。准确掌握滇中地区水稻各 生育期内需水量和有效降雨量的时空变化特征,对 于灌溉决策和水资源规划具有重要意义^[5]。

目前水稻需水量的计算主要是通过 Penman-Monteith 公式和作物系数法^[6]。针对不同区域水稻 需水量变化特征及其影响因子的分析方面已有较 多研究成果^[7-16],但存在以下几个问题:①FAO-56 将水稻生育期划分为3个阶段,即生长初期、生长中 期、生长后期,其相对应作物系数 K_e参考 FAO 推荐 的值^[9-11],或直接参考相关研究成果^[12-13],最终计 算结果与实际值存在一定误差;②水稻生育期和相 应作物系数 K_e参考当地灌溉试验结果^[14-16],但由于 地形、气候、供水条件和灌溉方式等不同,水稻种植 收割日期、灌水量、土壤渗漏量等情况均不同,地区 灌溉试验站数量偏少,空间分布不均匀,试验数据 缺乏一定的代表性。因此,开展地区水稻灌溉试验 研究,积累不同地区水稻需水量、作物系数等资料 是十分有必要的。

滇中地区灌溉试验工作长久以来处于低谷期, 仅在上世纪八十年代,开展过阶段性的水稻、玉米、 小麦等作物的灌溉试验工作,导致滇中地区灌溉试 验及相关研究长期滞后,资料长期缺失。目前,滇 中地区水稻需水方面的研究也较少^[17-19],如吴灏 等^[17]基于 CPORWAT 模型分析了昆明市水稻需水 量及灌溉用水量;王树鹏等^[18]在嵩明和大理开展了 不同灌溉条件下水稻的需水规律研究;张凯等^[19]在 昆明寻甸试验基地开展了不同灌溉条件下水稻需 水规律及节水潜力研究。基于水稻灌溉试验资料 计算滇中不同分区水稻不同生育期需水量变化特 征的研究更是鲜有报道。

另一方面,旱灾是云南省自然灾害中最频发、 持续时间最长,影响范围最广的自然灾害^[20]。随着 近年来干旱事件频发,缺水已成为了制约农业生产 发展主要的因素。在此背景下,本研究根据 2014— 2018 年滇中各区水稻灌溉试验资料,利用 1961— 2013 年滇中地区 48 个气象站最高气温、最低气温、 平均风速、相对湿度和降水量等逐日观测资料,分 析滇中各区水稻需水量 *ET*。有效降雨量 *P*。、净灌溉 需水量 *IR* 和灌溉需水指数 *IRI* 时空变化特征,研究 结果可为滇中地区优化水资源配置、云南省灌溉试 验站建设、水稻用水定额修订以及水稻灌溉制度制 定提供依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

滇中地区包括昆明、玉溪、红河、大理、曲靖、楚 雄和丽江等地(图1),气候属于低纬度高原山地季 风气候,日照充足,四季如春,位置偏北地区有短暂 的冬季,偏南地区有短暂的夏季,干湿季分明。年 降水量约为955.0 mm,雨季(5—10月)降水量占全 年85%以上,其中主汛期(6—8月)降水量占全年 40%以上,旱季(11月—次年4月)降水量仅占全年 15%左右。土壤类型主要为山原红壤、水稻土和紫 色土。地形以山地和山间盆地为主,地势起伏和 缓。根据自然条件、社会经济条件相一致的原则, 且当地作物种植结构和布局等特点基本类似,耕作 栽培制度、农艺配套措施、田间生产管理水平和灌 溉方式等基本一致^[21],将滇中地区划分为5个亚 区,分别为滇中 I-1 区、滇中 I-2 区、滇中 I-3 区、滇 中 I-4 区和干热河谷 \I区。

1.2 数据来源

收集了 1961—2013 年滇中地区 48 个气象站的 气象数据,包括最高和最低气温、平均气温、降水 量、风速、日照时数和相对湿度等逐日观测资料,数 据来自中国气象科学数据共享服务网。剔除异常 或缺失较长时序的数据,确保该时段数据的完整性。

1.3 水稻需水量计算

水稻日需水量 ET。由日参考作物蒸发蒸腾量 ET。和作物系数 K。相乘而得,具体公式如下:

$$ET_{i} = ET_{0} \times K_{i} \tag{1}$$

式中, ET_c 为水稻日需水量(mm); K_c 为水稻作物系数。

1.3.1 参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 采用 Penman – Monteith 公式^[22] 计算逐日参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) ,其在西南地区具有较好的适用性^[23],具体 公式如下:

$$ET_{0} = \frac{0.408\Delta(R_{n} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_{2}(e_{a} - e_{d})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_{2})}$$
(2)

式中, ET_0 是日参考作物蒸散量(mm,day); R_n 是到达作物表面的净辐射(MJ·m⁻²,day);G是土壤 热通量(MJ·m⁻²,day);T是2m高处日平均气温 (\mathcal{C}); u_2 是2m高处的平均风速(m·s⁻¹); e_d 是饱和 水汽压(kPa); e_a 是实际水汽压(kPa); $e_a - e_d$ 为饱 和水汽压差; Δ 为饱和水汽压曲线的倾率; γ 为湿度 计常数(kPa· \mathcal{C}^{-1})。

1.3.2 作物系数 K。根据云南省灌溉试验站提供的滇中 I-1 区嵩明站、滇中 I-2 区大理和姚安站,滇 中 I-3 区建水站,滇中 I-4 区陆良站水稻灌溉试验 资料,拟定滇中不同分区水稻作物系数 K。值,其中 滇中 I-2 区的大理和洱源气象站水稻需水量计算时 参考大理试验站,其余站点参考大姚试验站。目前 干热河谷区 VI 区农业种植结构变化较大,已由以水 稻、玉米为主的传统农业转变为以葡萄、柑橘、蔬菜 等为主的高原特色现代农业,因此干热河谷区 VI 区 水稻 K_e值参考相关地区的研究成果^[24],水稻播种日 期、各生育阶段时长、收获日期等通过查阅当地农 业物候资料和现场调查,并结合各水稻灌溉试验站 的数据确定,具体见表 1。

1.4 水稻净灌溉需水量和需水指数

水稻净灌溉需水量等于水稻需水量与有效降水量之差,表示满足渗漏损失、蒸散发和其他需水情况下的水量;水稻灌溉需水指数等于水稻净灌溉 需水量与需水量的比值,其可反映出水稻生长对灌溉的依赖程度及水稻相对缺水程度,也可在一定程度上反映水稻生长的旱涝情况^[25]。



表1 滇中不同分区站点水稻生育期 K。值

| Table 1 Crop coefficients K_c of rice in different subzones in Yunnan Pr | rovince |
|--|---------|
|--|---------|

| 站点 Site | 项目 Item | 返青期 Returning green stage | 分蘖期 Tillering stage | 拔节孕穗期 Jointing booting stage | 抽穗开花期 Heading flowering stage | 乳熟期 Milk stage | 黄熟期 Yellow ripening stage |
|--------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 滇中 I−1 区(嵩明站) | 日期 Date | 05-19-05-25 | 05-26-06-25 | 06-26-07-18 | 07-19-08-10 | 08-11-09-04 | 09-05-09-15 |
| Dianzhong I-1(Song ming) | K_c | 0.83 | 1.15 | 1.12 | 1.1 | 1.03 | 0.94 |
| 滇中 1-2 区(大理站) | 日期 Date | 05-30-06-08 | 06-09-07-11 | 07-12-08-05 | 08-06-08-25 | 08-26-09-19 | 09-20-10-01 |
| Dianzhong I-2(Da li) | K_{c} | 0.9 | 0.99 | 1.14 | 1.19 | 1.12 | 0.99 |
| 滇中 1-2 区(大姚站) | 日期 Date | 05-20-06-01 | 06-01-06-25 | 06-26-07-08 | 07-09-08-04 | 08-05-08-30 | 08-31-09-15 |
| Dianzhong I-2(Da yao) | K_c | 1.05 | 1.05 | 1.1 | 1.1 | 0.95 | 0.95 |
| 滇中 1-3 区(建水站) | 日期 Date | 05-26-06-05 | 06-06-07-04 | 07-05-08-04 | 08-05-08-27 | 08-28-09-16 | 09-17-09-30 |
| Dianzhong I-3(Jian shui) | K_c | 0.95 | 1.04 | 1.15 | 1.23 | 1.19 | 1.03 |
| 滇中 1-4 区(陆良站) | 日期 Date | 05-17-05-29 | 05-30-07-05 | 07-06-07-23 | 07-23-08-16 | 08-17-09-20 | 09-21-10-05 |
| Dianzhong I-4(Lu liang) | K_c | 0.92 | 1.05 | 1.22 | 1.31 | 1.22 | 1.09 |
| 干热河谷区VI区 | 日期 Date | 05-01-05-11 | 05-12-06-13 | 06-14-07-06 | 07-07-08-01 | 08-02-08-23 | 08-24-09-04 |
| Xerothermal valley VI | K_{c} | 0.85 | 1.31 | 1.69 | 1.93 | 1.84 | 1.33 |

 $IR = ET_c - P_e$ (3) $IRI = IR/ET_c$ (4)

式中,IR为作物净灌溉需水量(mm);P。为作物生育 期有效降雨量(mm);IRI为作物灌溉需水指数。

曹

水稻各生育期的有效降雨量采用美国农业部 土壤保持局(USDA) 推荐的方法计算^[26]。

 $P_{e} = \begin{cases} P \times (4.17 - 0.2P)/4.17 & (P_{i} \le 8.3 \text{mm}) \\ 4.17 + 0.1P & (P_{i} > 8.3 \text{mm}) \end{cases}$ (5)

式中,P。为日有效降水量,P为日降水量。

1.5 分析方法

采用线性趋势法和 Mann-Kendall 趋势检验对 滇中地区水稻不同生育阶段需水量、有效降水量、 灌溉需水量、需水指数进行趋势分析,其中时间序 列自相关对 Mann-Kendall 趋势检验精度会产生影 响,因此本文采用白热化(Pre-Whitening)方法对存 在自相关性的序列消除时间序列自相关性^[27];显著 水平 α 分别为 0.5 和 0.01, 当 $\alpha \le 0.01$, 即|Z| > 2.58时, 说明检验具有极高显著性水平; 当 0.01 < $\alpha \le$ 0.05, 即|Z| > 1.96 且|Z| < 2.58时, 说明检验具有显 著性水平; 当 $\alpha > 0.05$, 即-1.96 < Z < 1.96时, 为无显 著变化趋势。统计量 Z 为正是上升趋势, 为负则为 下降趋势, 为零则无趋势。

利用 Arcgis 10.0 软件中 Kriging 插值法分析滇 中地区水稻不同生育期 ET_e 、 P_e 、IR 和 IRI 的空间变 化趋势。

2 结果与分析

2.1 水稻需水量、有效降雨量和灌溉需水指数的时间变化特征

根据公式(1)~(5)计算滇中48个气象站的水 稻需水量、有效降水量和灌溉需水指数,分别求得 滇中各分区各指标逐年值。由图2可知,1961—2013



图 2 1961—2013 年滇中不同分区 ET,、P,和 IRI 的年际变化

Fig.2 The inter-annual variation of ET_e, P_e and IRI in different subregions in the central Yunnan Province during 1961-2013

年滇中地区水稻全生育期 ET_介于 505.92~597.04 mm之间, P_介于 170.31~303.25 mm 之间, IRI 介于 0.42~0.69 之间。其中滇中 I-1 区 ET 和 IRI 最小, 分别为423.79 mm 和0.41; 滇中 I-4 区 P.最大, 达到 268.76 mm; 干热河谷区 \I区 ET。和 IRI 最大, 分别为 852.24 mm 和 0.76, P。最小, 仅为 203.36 mm, 除干热 河谷区VI区外,其余地区 IRI 基本与云贵地区主要 作物 IRI<0.5 的结论一致^[28]。在变化趋势方面,滇 中地区 ET_e(Z=-2.0634) 和 P_e(Z=-2.2935) 均呈显 著减少趋势,减幅为 4.358 mm · 10a⁻¹和 6.468 mm ·10a⁻¹, IRI(Z=1.4191) 呈波动上升趋势, 增幅为 0.8% · 10a⁻¹;其中滇中 I-1 区、滇中 I-2 区和干热 河谷区 Ⅵ区 ET,呈减小趋势,干热河谷 Ⅵ区(Z= -3.5976)呈极显著减小趋势,减幅为 19.502 mm · 10a⁻¹, 滇中 I-3 区和滇中 I-4 区 ET 呈上升趋势; 各 区 P。均呈减小趋势, 滇中 I-1 区(Z=-2.2629) 呈显 著减小趋势,滇中 I-2 区(Z=-2.6617)、滇中 I-3 区 (Z=-3.0453)和滇中 I-4 区(Z=-2.6464)呈极显著 减小趋势,干热河谷 VI区(Z=-0.7747)呈弱减小趋 势,各区减幅分别为 6.206、7.573、8.112、8.469 mm・ 10a⁻¹和 1.978 mm・10a⁻¹;*IRI* 仅干热河谷 VI 区呈减 小趋势,其余各区 *IRI* 均呈上升趋势,滇中 I-3 区(Z =2.4623)和滇中 I-4 区(Z=2.2322)呈显著上升趋 势,上升幅度分别为 1.70% · 10a⁻¹和 1.60% · 10a⁻¹。 可见,滇中地区水稻 *IRI* 呈上升趋势,水稻相对缺水 程度呈上升趋势,与滇中地区干燥指数上升趋势一 致^[28],*ET_e* 减小主要集中在滇中 I-2 区和干热河谷 VI 区,*P_e* 减小趋势主要集中在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区, *IRI* 上升趋势主要集中在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区,

从滇中各区水稻不同生育期 $ET_c \ P_e \ IR$ 和 IRI的 Man-Kendall 趋势检验结果看(表 2), 滇中 I-1 区各生育期 $ET_c \ P_e$ 均呈减小趋势; IR 和 IRI 大部

| 表 2 溴中水稻不同生育期 ET_c, P_e 、 R 和 IRI 变化趋势的斜率 | |
|---|--|
|---|--|

Table 2 Variation slope of ET_c, P_e, IR, and IRI in different growth stages of rice in the central Yunnan Province

| 生育期 Growth period | 分区 Subregion | $ET_c/(\text{mm} \cdot 10a^{-1})$ | $P_e/(\mathrm{mm}\boldsymbol{\cdot}10\mathrm{a}^{-1})$ | $IR/(mm \cdot 10a^{-1})$ | IRI/10a ⁻¹ |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| 返青期 Returning green stage | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -0.0938 | -0.1515 | 0.1038 | 0.0054 |
| | 滇中 I-2 区 Dianzhong I-2 | -1.0110 | 0.1499 | -1.0434 | -0.0080 |
| | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | -0.4381 | -0.0965 | -0.5322 | -0.0071 |
| | 滇中 I-4区 Dianzhong I-4 | -0.5178 | 0.4191 | -0.6935 | -0.0091 |
| | 干热河谷VI区 Xerothermal valley VI | -0.9777 | 0.0237 | -0.9255 | -0.0008 |
| | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -0.0909 | -1.1630 | 0.9034 | 0.0090 |
| | 滇中 I-2 区 Dianzhong I-2 | 0.4652 | -2.2087 * | 2.3561 | 0.0249 |
| 分蘖期 | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | 1.2547 | -3.1667 * * | 3.9724 * | 0.0342 * * |
| Tillering stage | 滇中 I-4 区 Dianzhong I-4 | 0.6753 | -2.0676 | 2.4142 | 0.0166 |
| Thioring stage | 干热河谷VI区 Xerothermal valley VI | -7.5165 * | 0.7588 | -8.3242 | -0.0091 |
| | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -1.1013 * | -0.7410 | -0.4072 | 0.0011 |
| | 滇中 I-2 区 Dianzhong I-2 | -0.8206 * | -0.4434 | -0.4084 | 0.0009 |
| 拔节孕穗期 | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | -0.2555 | -0.0629 | -0.7196 | 0.0039 |
| Jointing booting stage | 滇中 I-4区 Dianzhong I-4 | -0.8080 | 0.7681 | -1.8014 | -0.0143 |
| | 干热河谷 N区 Xerothermal valley VI | -3.7477 | -0.2837 | -3.2473 | -0.0029 |
| | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -0.2141 | -1.3839 | 1.2091 | 0.0152 |
| | 滇中 I-2 区 Dianzhong I-2 | -0.7820 | -1.3657 | 0.4591 | 0.0059 |
| 抽穗开花期 | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | 0.3658 | -2.5402 * * | 3.2641 * | 0.0301 * |
| Heading flowering stage | 滇中 I-4 区 Dianzhong I-4 | 1.1603 * * | -3.4672 * * | 4.9303 * * | 0.0415 |
| | 干热河谷 VI 区 Xerothermal valley VI | -6.4445 * * | 1.3804 | -7.6419 * | -0.0156 |
| | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -0.8270 | -2.3163 | 1.6238 | 0.0217 |
| | 滇中 I-2 区 Dianzhong I-2 | 0.7374 | -4.0230 * * | 4.5936* | 0.0510 * * |
| 乳熟期 | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | -0.0325 | -1.7614 | 1.9611 | 0.0238 |
| Milk stage | 滇中 I-4区 Dianzhong I-4 | -0.1043 | -2.8033 | 2.8111 | 0.0207 |
| | 干热河谷 VI区 Xerothermal valley VI | -1.6426 | -3.0377 * * | 1.3562 | 0.0157 * |
| | 滇中 I-1 区 Dianzhong I-1 | -0.4836 | -1.0109 | 0.6132 | 0.0254 |
| 黄熟期 Yellow Ripening stage | 滇中 I-2区 Dianzhong I-2 | -0.3281 | -1.1294 | 0.8787 | 0.0150 |
| | 滇中 I-3 区 Dianzhong I-3 | 0.3443 | -0.1041 | 0.5141 | 0.0018 |
| | 滇中 I-4区 Dianzhong I-4 | 0.0081 | -0.5009 | 0.5265 | 0.0098 |
| | 干热河谷VI区 Xerothermal valley VI | -2.7859 * * | -0.2514 | -2.8925 | -0.0162 |

注:*表示 α=0.05 水平差异显著,**表示 α=0.01 水平差异极显著。

Note: * indicates that the difference is significant at $\alpha = 0.05$ level, and * * indicates that the significant difference at $\alpha = 0.01$ level.

分生育期呈上升趋势。滇中 I-2 区各生育期 ET 和 P。大部分呈减小趋势;IR 和 IRI 各生育期大部分呈 上升趋势。滇中 I-3 区返青期、拔节孕穗期和乳熟 期ET。呈减小趋势,分蘖期、抽穗开花期和黄熟期 ET。呈上升趋势; IR 和 IRI 大部分生育期呈上升趋 势。滇中 I-4 区返青期、拔节孕穗期和乳熟期 ET。 呈减小趋势,分蘖期、抽穗开花期和黄熟期 ET。呈上 升趋势;返青期和拔节孕穗期P。呈上升趋势,其余 生育期 P。呈减小趋势; IR 和 IRI 整体呈上升趋势。 干热河谷VI区各生育期 ET。均呈减小趋势;返青期、 分蘖期和抽穗开花期 P。呈上升趋势,拔节孕穗期、 乳熟期和黄熟期 P。呈减小趋势;除乳熟期外 IR 和 IRI 均呈减小趋势,其中抽穗开花期 IR 呈显著减小 趋势,乳熟期 IRI 呈显著上升趋势。根据水稻各生 育期 $ET_{N}P_{N}IR$ 和 IRI 的变化规律, 滇中 I-1 区和 滇中 I-2 区变化趋势一致,滇中 I-3 区和滇中 I-4 区变化趋势一致,干热河谷Ⅵ区与其他各区差异较 大,ET,P,IR 和 IRI 显著变化主要出现在抽穗开花 期、分蘖期和乳熟期。

2.2 水稻需水量的空间变化特征

由图 3a~f 可知, 滇中水稻 ET_e呈分蘖期>抽穗 开花期>乳熟期>拔节孕穗期>返青期>黄熟期的趋 势;分蘖期雨季尚未到来, 气温高、风速大, 田面蒸 发较大; 抽穗开花期随着进入雨季, 相对湿度增大, 水稻生长旺盛, 蒸发蒸腾量增大, 导致该生育期 ET_e 较大。返青期 ET_e呈中部低四周高的分布特征, 分 蘖期 ET。呈北高南低的分布特征,拔节孕穗期 ET。呈 中部高东西低的分布特征,抽穗开花期、乳熟期和 黄熟期 ET。呈中东部低北部高的分布特征。ET。高 值区主要分布在中北部的干热河谷 Ⅵ区,低值区主 要分布在中东部。

由图 4a~f 可知,79.17%站点返青期 ET_e呈减小 趋势,且减幅由中部向东西部递减;56.25%站点分 藥期 ET_e呈上升趋势,增幅由南部和西南部向中部 递减;89.58%站点拔节孕穗期 ET_e呈减小趋势,减幅 由中部向东西部递减;58.33%站点抽穗开花期 ET_e 呈减小趋势,减幅由中部向东南和西南递减; 60.42%站点乳熟期和黄熟期 ET_e呈减小趋势,减幅 均由中部向西部和东南部递减。各生育期内 ET_e减 幅高值区主要分布在中北部,增幅高值区主要分布 在东南部和西南部。

由图 3g 和图 4g 可知, 滇中水稻全生育期 ET。整体上呈中东低中北部高的分布特征; 72.92% 站点 ET。呈减小趋势, 减幅由中部向东西部递减, 东川等 8 个站点 ET。呈极显著或显著减小趋势。

2.3 水稻有效降雨量的空间变化特征

由图 5a~f 可知,滇中水稻 P_e呈抽穗开花期>分 藥期>拔节孕穗期>乳熟期>返青期>黄熟期的趋势; 抽穗开花期和乳熟期 P_e整体上呈南部低西北高,黄 熟期 P_e则呈相反的分布特征,返青期、分蘖期和拔节 孕穗期 P_e整体上呈中北部低东西部高。P_e低值区由 中部逐渐向东南和西部转移,再逐渐向西北转移。



Fig.3 Spatial distributions of ET_c in different growth stages of rice during 1961-2013

231



Fig.4 Spatial variation of ET_c in different growth stages of rice during 1961-2013



图 5 1961—2013 年滇中水稻不同生育期有效降雨量空间分布

Fig.5 Spatial distributions of P_e in different growth stages of rice during 1961–2013

由图 6a~f 可知,56.25%站点返青期 P_e呈上升 趋势,上升幅度由中东部向西部递减;87.50%站点 分蘖期 P_e呈减小趋势,减幅由西南向东北递减; 52.08%站点拔节孕穗期 P_e呈上升趋势,增幅由中部 向西南和东北递增;81.25%站点抽穗开花期 P_e呈减 小趋势,减幅由东部向西北递减;89.58%站点乳熟 期 P_e呈减小趋势,减幅呈中部和东部高,西南低的 趋势;81.25%站点黄熟期 P_e呈减小趋势,减幅由中东向西北和东南递减。P_e减幅高值区主要分布在中东部,增幅高值区主要分布在中西部。

由图 5g 和图 6g 可知,滇中水稻全生育期 P。整体上呈东部高中西低的分布特征,与 ET。呈相反分布特征;97.92%站点 P。呈减小趋势,减幅由东部向西部递减,沾益等 24 个站点 P。呈极显著或显著减小趋势。

2.4 水稻灌溉需水指数的空间变化特征

曹

由图 7a~f 可知,滇中水稻 IRI 呈返青期>分蘖 期>黄熟期>乳熟期>拔节孕穗期>抽穗开花期的趋 势。返青期、分蘖期和黄熟期 IRI 均大于 0.5,表明 滇中地区在平水年降水条件下,水稻在这些生育期 生长需人工灌溉,否则会出现干旱缺水的现象,主 要由于在返青期和分蘖期刚进入雨季,黄熟期雨季 即将结束,降雨频次和降雨量相对于其他生育期相 对较少,缺水风险相对较高。乳熟期、拔节孕穗期 和抽穗开花期 IRI 均小于 0.5,表明水稻在这些生育 期降水频率高,出现缺水年份相对较少。返青期、 分蘖期和拔节孕穗期 IRI 整体上呈中北部高东西部低的分布特征,抽穗开花期、乳熟期和黄熟期 IRI 整体上呈四周高中部低的分布特征。IRI 高值区由中北部向东部和南部转移,低值区由东部向中部转移,且低值区范围逐渐缩小。

由图 8a~f 可知,58.33%站点返青期 IRI 呈减小 趋势,减幅由西向东递减;81.25%站点分蘖期 IRI 呈 上升趋势,增幅由中部向西南和东南递增;60.42% 站点拔节抽穗期 IRI 呈减小趋势,减幅由中部向东 西部递减;77.08%站点抽穗开花期 IRI 呈上升趋势, 增幅由中部向东西部递增;95.83%站点乳熟期 IRI



图 6 1961—2013 年滇中水稻不同生育期有效降雨量空间变化

Fig.6 Spatial variation of P_e in different growth stages of rice during 1961–2013



图 7 1961—2013 年滇中水稻不同生育期灌溉需水指数空间分布

Fig.7 Spatial distributions of IRI in different growth stages of rice during 1961-2013



图 8 1961—2013 年滇中水稻不同生育期灌溉需水指数空间变化 Fig.8 Spatial variations of *IRI* in different growth stages of rice during 1961-2013

呈上升趋势,增幅由东向西递减;70.83%站点黄熟 期 IRI 呈上升趋势,增幅由中东向西北递减。IRI 增 幅高值区主要分布在中东部,减幅高值区主要分布 在中北部。

由图 7g 和 8g 可知, 滇中水稻全生育期年均 IRI 为 0.58, 整体上呈中东低中北部高的分布特征; 83.33%站点 IRI 呈上升趋势, 上升幅度由东部向西部 递减, 洱源等 13 个站点 IRI 呈极显著或显著上升趋势。

3 讨 论

本研究发现滇中水稻不同生育期 ET。与 P。均呈 现相反的变化特征,导致滇中中北部 IRI 处于高值 区,中东部 IRI 处于低值区,IRI 增幅高值区主要分 布在中东部,减幅高值区主要分布在中北部。由于 滇中地区近年来增温趋势明显^[4],作物生长期显著 延长^[3],水稻生育期需水量增加^[29-31],导致水资源 压力增加,尤其是在滇中中东部。ET。、P。和 IRI 显 著变化主要出现在抽穗开花期、分蘖期和乳熟期, 抽穗开花期需水量对水稻产量影响最大^[32-33],分蘖 期过度水分亏缺,会抑制稻株的分蘖,分蘖数减小将 会影响有效穗数^[34]。因此,抽穗开花期和分蘖期 IRI 增加,将会增加干旱概率,影响水稻产量,这种状况需 引起当地水务和农业等相关部门的高度关注。

此外,根据滇中不同分区水稻需水量和有效降雨量,利用公式(3)得到不同分区逐年的净灌溉需水量,滇中I-1区、滇中I-2区、滇中I-3区滇中I-4区和干热河谷 II区水稻净灌溉水量多年平均值分别为174.60、194.58、270.33、263.51 mm和648.88 mm,整体呈现出滇中I-1区<滇中I-2区<滇中I-4

区<滇中1-3区<干热河谷Ⅵ区的趋势,与实际情况 基本符合^[21]。同时采用矩法公式推求不同水平年 份(保证率 P=50%、P=75% 和 P=90%)各区水稻 净灌溉用水量,与《云南省地方标准用水定额》 (DB53/T168-2013)比较,发现通过矩法推求的不 同水平年份下水稻净灌溉用水量均明显小于灌溉 用水定额^[1]。一方面由于水稻品种、灌水方式和土 壤类型等都会影响水稻需水量^[30-31],各区水稻灌溉 试验站所采用的水稻品种均为当地农民常用品种, 但各地差异相对较大,种植品种存在不确定性;各 地区灌水方式和田间管网差异也相对较大,如在水 资源严重短缺的干热河谷地区实行农业水价改革, 大面积实行节水灌溉、控制灌溉等均会有效减小净 灌溉需水量,在水资源丰富的地区,水稻灌水仍是 传统淹灌模式,人们节水意识相对较差,净灌溉需 水量反而会增加。另一方面,滇中地区灌溉试验站 数量相对偏少、试验数据时序较短,且空间分布不 均,也可能会影响净灌溉需水量的计算;加之净灌 溉需水量未考虑水稻移栽前的泡田水量,如2016年 (平水年)建水水稻灌溉试验站实测泡田水量为 1950 m³ · hm^{-1[35-36]},以上各因素综合作用导致净 灌溉需水量较《云南省地方标准用水定额》偏小。

4 结 论

1)1961—2013 年滇中地区水稻 *ET_e*、*P_e*、*IR* 和 *IRI* 平均值分别为 546.34、235.96、310.38 mm 和 0.57,*ET_e*和 *P_e*均呈显著减少趋势,*IR* 和 *IRI* 呈波动 上升趋势,其变化幅度分别为-4.358、-6.468、1.2 mm · 10a⁻¹和 0.8% · 10a⁻¹。*ET_e*减小趋势主要集中 在滇中 I-2 和干热河谷 Ⅵ区, P_e减小趋势主要集中 在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区, *IRI* 上升趋势主要集中 在滇中 I-3 区和滇中 I-4 区。

曹

2)1961—2013 年滇中水稻 ET_e呈分蘖期>抽穗 开花期>乳熟期>拔节孕穗期>返青期>黄熟期的趋势,整体上呈中东低中北部高的分布特征,且 ET_e减 幅由中部向东西部递减。ET_e高值区主要分布在中 北部的干热河谷 NI区,低值区主要分布在中东部; ET_e减幅高值区主要分布在中北部,增幅高值区主要 分布在东南部和西南部。

3)1961—2013 年滇中水稻 P_e呈抽穗开花期> 分蘖期>拔节孕穗期>乳熟期>返青期>黄熟期的趋势,整体上呈东部高中西低的分布特征,P_e减幅由东 部向西部递减。P_e低值区由中部逐渐向东南和西部 转移,再逐渐向西北转移;P_e减幅高值区主要分布在 中东部,增幅高值区主要分布在中西部。

4)1961—2013 年滇中水稻 *IRI* 呈返青期>分蘖 期>黄熟期>乳熟期>拔节孕穗期>抽穗开花期的趋 势,整体上呈中东低中北部高的分布特征,*IRI* 增幅 度由东部向西部递减。*IRI* 高值区由中北部向东和 南部转移,低值区由东部向中部转移,且低值区范 围逐渐缩小;*IRI* 增幅高值区主要分布在中东部,减 幅高值区主要分布在中北部。

参考文献:

- [1] 段琪彩,黄英,韩焕豪,等.云南半湿润区水稻需水规律试验研究[J].中国农村水利水电,2018,(11):21-25.
- [2] 云南省农牧渔业厅. 云南省种植业区划[M].昆明:云南科技出版 社,1992:73.
- [3] 王杰,曹言,黄英,等. 滇中地区作物生长期时空变化特征及影响因子分析[J].灌溉排水学报,2017,36(8):83-88.
- [4] 郑亦佳,缪育聪,刘树华,等.近51年云南滇中地区地面气象要素 变化特征的统计分析[J].北京大学学报(自然科学版),2017,52
 (1):8-18.
- [5] Dalezios N R, Loukas A, Bampzelis D. Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece[J].Physics and Chemistry of the Earth, 2002,27(23-24):1031-1038.
- [6] 聂堂哲,张忠学,林彦宇,等. 1959—2015 年黑龙江玉米需水量时空 分布特征[J].农业机械学报,2018,49(7):217-227.
- [7] Kumar S. Reference evapotranspiration (ET₀) and irrigation water requirement of different crops in Bihar[J]. Journal of Agrometeorology, 2017,19(3):238-241.
- [8] 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):270-290.
- [9] 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.
- [10] 黄志刚,王小立,肖烨,等. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量 的影响[J].应用生态学报,2015,1(26):260-268.
- [11] 王卫光,彭世彰,孙凤朝,等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需 水量时空变化特征[J].水科学进展,2012,23(5):656-664.
- [12] 罗玉峰,彭世彰,王卫光,等. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响--以高邮灌区为例[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(5);

609-613.

- [13] 符娜,刘小刚,张岩,等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J].生态学杂志,2014,33(7):1895-1901.
- [14] 李绅东,熊玉江,余仲相,等. 气候变化对水稻灌溉需水量影响研究[J].节水灌溉,2018,(9):37-41.
- [15] 雷宏军,乔珊珊,潘红卫,等.贵州省农业净灌溉需水量与灌溉需水指数的时空分布[J].农业工程学报,2016,32(12):115-121.
- [16] 马文津,刘诗梦,卫琦,等. 气候变化下黑龙江省水稻灌溉需水量 变化特征[J].水资源与水工程学报,2018,29(4):236-242.
- [17] 吴灏, 王杰, 黄英, 等. 基于 CPORWAT 模型的昆明市水稻需水量 及灌溉用水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7); 101-104.
- [18] 王树鹏,韩焕豪,崔远来,等. 滇中过水稻不同灌溉模式需水规律 及水分生产率研究[J].中国农村水利水电,2016,(8):121-124.
- [19] 张凯,王莹,杨士红,等. 滇中水分调控条件下水稻需水规律及节水潜力[J].江苏农业科学,2019,47(5):56-58.
- [20] 谢应齐,样子生. 云南省农业自然灾害区划[M].北京:中国农业出版社,1995:271.
- [21] 张玉蓉,顾世祥,谢波,等. 云南省农业灌溉用水定额标准的编制 [J].水利水电科技进展,2007,27(2):80-84.
- [22] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evaporanspirationguidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M].Rome;FAO,1998;17-27.
- [23] 苏秀程,王磊,李奇临,等.近 50a 中国西南地区地表干湿状况研究 [J].自然资源学报,2014,29(1):104-116.
- [24] 高晓丽,徐俊增,杨士红,等.贵州地区主要作物需水规律与作物 系数的研究[J].中国农村水利水电,2015,(1):11-14.
- [25] 曹永强,李维佳,赵博雅. 气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J].资源科学,2018,40(1):150-160.
- [26] Smith M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management[M].Rome:FAO,1992:126.
- [27] Yue S, Wang C Y. Applicability of pre-whitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J].Water Resources Research, 2002, 38(6):1-7.
- [28] 曹言,王杰,黄英,等. 基于干燥指数的近 45 年云南滇中地区干湿 状况的变化特征[J].水土保持研究,2018,25(1):243-249.
- [29] Ding Y M, Wang W G, Song R M, et al. Modeling spatial and temporal variability of the impact of climate change on rice irrigation water requirements in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China[J].Agricultural Water Management, 2017, 193:89-101.
- [30] Ye Q, Yang X G, Dai S W, et al. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, cropping systems and crop water requirements in southern China [J]. Agricultural Water Management, 2015,159:35-44.
- [31] Acharjee T K, Halsema G V, Ludwig F, et al. Declining trends of water requirements of dry season *Boro* rice in the north-west Bangladesh[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180:148-159.
- [32] 顾世祥,何大明,李远华,等."通道-阻隔"作用对纵向岭谷区水稻 灌溉需水的影响[J].科学通报,2006,51(S2):8-13.
- [33] 魏永霞,汝晨,刘慧,等. 黑土区水稻耗需水过程与产量形成及水 分利用的响应关系[J].东北农业大学学报,2018,49(1):56-65.
- [34] 于靖,徐淑琴,高婷. 分蘖期不同程度水分胁迫对水稻需水规律及 生长发育的影响[J].节水灌溉,2012,(7):21-23.
- [35] 顾世祥,张玉蓉,谢波,等. 云南省用水定额标准制定研究[J].节水 灌溉,2012,(11):46-49.
- [36] 谢先红,崔远来,顾世祥.云南水稻灌溉定额与农业综合灌溉定额的空间变异性[J].农业工程学报,2007,23(5):95-99.