

低丘红壤区稻田实际蒸散特征及其气象影响因素

李 谦^{1,2} 景元书^{1,2,3*} 马美娟^{2,3} 王 晗^{2,3} 李 根^{1,2}

(¹气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; ²江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; ³南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘 要 本研究分析了低丘红壤地区晚稻全生育期田间气象观测数据, 阐明了水稻各生育期实际蒸散量特征及规律, 采用通径分析方法与 Beven 敏感性公式对比研究了气象因子对实际蒸散的影响。结果表明: 全生育期蒸散实测值为 290.6 mm, 其中移栽-分蘖期实测蒸散量最大, 为 96.9 mm, 占全生育期蒸散量的 33.3%; 逐日蒸散整体呈现先增加后逐渐减小的趋势, 高峰期出现在水稻分蘖中后期; 一天中稻田蒸散逐时动态变化总体遵循“早晚低、中午高”的倒“U”单峰型变化规律, 天气条件和生长期不同时也会产生一定的差异; 通径分析与敏感性分析表明, 净辐射、相对湿度等气象因子具有较高的总贡献系数和敏感性系数, 是影响该区稻田蒸散的主要气象因素; 其次为最高气温、最低气温、平均温度 3 个温度因子, 而风速对蒸散的影响作用较小; 蒸散量变化与气象因子间的关系存在时间尺度差异, 相比于逐时尺度, 逐日尺度上各气象因子对实际蒸散量的影响效果更为明显。

关键词 实际蒸散; 通径分析; 时间尺度; 气象因子

The characteristics of actual evapotranspiration and influencing factors of paddy field in low hilly red soil region. LI Qian^{1,2}, JING Yuan-shu^{1,2,3*}, MA Mei-juan^{2,3}, WANG Han^{2,3}, LI Gen^{1,2} (¹*Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecasting Warning and Assessment, Nanjing 210044, China*; ²*Key Laboratory of Agricultural Meteorology in Jiangsu, Nanjing 210044, China*; ³*College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*).

Abstract: In this study, we used the data of field meteorological observation of late rice in low hilly red soil region and analyzed the distribution characteristics with typical diurnal and monthly variation of the actual evapotranspiration of rice field at different growth stages. At the same time, the influences of meteorological factors on the actual evapotranspiration were studied by using the path analysis method and Beven's sensitivity formula. The results indicated that the actual value of evapotranspiration during the whole growth period was 290.61 mm and the measured evapotranspiration value was the largest at transplanting-tillering stage, which was 96.91 mm, accounting for 33.3% of the whole growth period. The evapotranspiration of paddy field in the whole growth period showed a tendency to increase first and then decrease gradually. The peak appeared in the later stage of rice tillering. The change of rice field evapotranspiration in one day showed the low intensity in the morning and evening but high at the noon, which just liked a 'reverse' U. Weather conditions and the duration of growth period also had some influences on evapotranspiration. Path analysis and sensitivity analysis showed that net radiation and relative humidity had higher total contribution coefficient and sensitivity coefficient, which means these two factors were the main meteorological factors that affected the evapotranspiration of paddy field. The three temperature factors (the highest temperature, lowest temperature, average temperature) were in the next place, and the wind speed's effects on evapotranspiration were little. There was a significant time scale difference for the relationship between evapotranspiration and meteorological factors.

国家自然科学基金项目(41575111)、科技部公益性行业专项(GYHY201406025 和 GYHY200906030)和江苏省研究生科研创新计划项目(KY-LX15-0868)资助。

收稿日期: 2017-04-12 接受日期: 2017-09-06

* 通讯作者 E-mail: jingyushu@163.com

The effect of each meteorological factor on the actual evapotranspiration was more significant at daily scale than at hourly scale.

Key words: actual evapotranspiration; path analysis; time scale; meteorological factors.

农田生态系统中,作物蒸腾量与裸间土壤蒸发量的总和即农田实际蒸散(吴荣军等,2016)。自然条件下,农田实际蒸散会受到天气条件、作物类型、土壤物理特性等多种因素的影响,但作为农田生态系统能量与水分平衡的重要环节,其在水循环中受气象因素变化的影响最为直接(贾红,2008)。因此,了解稻田实际蒸散的变化特征,深入分析蒸散发变化与气象因子的响应关系,对于研究地区水热平衡变化、深入探索气候变化对区域水文循环的影响皆具有重要的理论和实践意义。

在气候变化背景下,众多研究者聚焦于蒸散与气象要素之间的复杂关系。Gong 等(2006)通过偏导数计算了长江流域参考作物蒸散对主要气象要素变化的响应程度。Liu 等(2011)基于 Penman-Monteith 公式分析认为,青藏高原潜在蒸散的主导气象因子敏感性具有时空差异。曾丽红等(2010)采用像元分析法,发现松嫩平原蒸散量与平均气温及降水间的正相关性。汪精海等(2017)基于云模型与通径分析方法对黑河流域蒸散及影响因子进行了研究。很显然,以往研究方法多集中于区域范围较大的流域或地区,且对象局限于年际变化、年代际变化等较大时间尺度上的潜在蒸散。迄今为止,在时空尺度均为小范围的农田实际蒸散研究中还鲜有提及。

若将通径分析、敏感度分析方法成功引入小尺度的农田蒸散研究,那么这一结果将具有一定的现实意义。本文选取江西鹰潭低丘红壤地区稻田为研究对象,划分逐时、逐日两个时间尺度,运用波文比相关技术测算稻田生态系统实际蒸散量,基于通径分析原理及 Beven 敏感性公式,采取控制单因子变化以及分离因子间直接、间接作用等方式对影响该稻区实际蒸散量的气象因子进行了定量分析。该研究有助于进一步了解红壤区稻田实际蒸散特征以及小尺度范围下蒸散与气象因子的定量关系,同时为不同尺度蒸散量的预测、区域气候变化研究、小流域农业水资源精细化管理等方面提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省鹰潭市余江县孙家小流域

(116°55'E,28°15'N),地处武夷山至潘阳湖平原的过渡地带—鹰潭盆地,地形以低丘岗地为主。属亚热带湿润季风气候,具有四季分明,雨量充沛,日照充足等气候特点。试验所在地地势平坦,海拔 38~55 m。年平均温度 17.6℃,年平均日照时数 1739.4 h,无霜期 258 d。主要土壤类型为红壤,成土母质为第四纪红色粘土,土层深厚、土质粘重,保水护肥能力差。7—9 月作物生长季节高温少雨,蒸发量约占全年的 50%,田间蒸散发量大于实际降水量时易引发伏秋旱。

1.2 数据来源

研究区晚稻于 2015 年 6 月 18 日播种,2015 年 7 月 23 日移栽,2015 年 11 月 10 日收获,具体生育期可见表 1。稻田分别随机布置多个 HOBO 自动气象观测站(ONSET U30),观测内容主要包括气温、气压、相对湿度、2 m 高度处风速、降水量等。显热通量和土壤热通量等数据由波文比综合观测系统进行测定。其他常规气象要素的补充数据来源于余江县气象局。

1.3 实际蒸散的测定与模拟

1.3.1 波文比-能量平衡法 1926 年 Bowen 提出波文比(β)的概念,其定义为给定表面的显热通量与潜热通量的比值。当水汽与热量的湍流交换系数相等时($K_h=K_w$),波文比通常可表示为:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$$
 (1)

式中, $\gamma = (C_p P) / (\epsilon L) = 0.65 \times 10^3 P$, γ 为干湿表常数($\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}$), P 为测站实际气压(hPa), Δe 、 ΔT 分别为两观测层间的水气压差与温度差。结合下垫面能量平衡方程可进一步得到:

$$R_n = \lambda E + H + G$$
 (2)

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + \beta)$$
 (3)

表 1 试验稻田的生育日期和叶面积指数
Table 1 Growth stages and leaf area index of paddy field under experiment condition

生育期	日期	叶面积指数
移栽-分蘖期	7-23-8-15	0.57
拔节-孕穗期	8-16-9-10	3.82
抽穗-乳熟期	9-11-10-5	4.43
成熟-收获期	10-6-11-10	2.23

式中, R_n 为净辐射 ($W \cdot m^{-2}$), H 为显热通量 ($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量 ($W \cdot m^{-2}$)。波文比能量平衡法可根据测定的净辐射通量、土壤热通量和温度、水气压差, 得到作物冠层上方的实际蒸散值。文中参照拒绝域对波文比值进行了动态筛选 (Hu *et al.*, 2014)。

1.3.2 实际蒸散的估算 估算农田的实际蒸散通常由作物系数乘以参考蒸散求得。参考蒸散的计算由联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式 (刘斌, 2015):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中, ET_0 为作物潜在蒸散 ($mm \cdot d^{-1}$), Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率 ($KPa \cdot ^\circ C^{-1}$), u_2 为 2 m 处风速 ($m \cdot s^{-1}$), e_s 为空气温度 T 下的饱和水汽压 (KPa), e_a 为空气温度 T 下的实际水汽压 (KPa)。在参考蒸散的计算基础上对实际蒸散进行估算, 参照当地气候条件和作物叶面积指数订正作物系数 K_c :

$$K_c = K_{LAI} \times K_e \quad (5)$$

$$K_{LAI} = \frac{a \times LAI}{b + LAI} \quad (6)$$

$$K_e = K_{FAO} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (7)$$

式中, K_c 为作物系数, K_{LAI} 与 K_e 分别为仅受生物因子、环境因子影响的作物系数, K_{FAO} 为 FAO 推荐的作物系数, RH_{min} 为最小相对湿度, h 为作物冠层高度。将实测蒸散与参考蒸散相除得的实际作物系数, 与所测 LAI 通过米氏方程拟合得到 K_{LAI} 并最终建立作物系数的动态模型 (刘钰, 2000; 彭世彰等, 2007; 高磊等, 2016)。

1.4 敏感系数的定义及计算

蒸散的气象敏感系数是衡量各气象要素 (如气温、风速等) 变化对蒸散发影响的重要指标 (刘小莽等, 2009)。文中定义实际蒸散的气象敏感系数为实际蒸散量变化率与气象要素变化率之比, 即:

$$S_{xi} = \lim_{\Delta x/xi} \left(\frac{\Delta ET_a / ET_a}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial ET_a}{\partial x} \cdot \frac{x}{ET_a} \quad (8)$$

式中, x_i 代表气象要素, S_{xi} 为实际蒸散量对第 i 个气象要素的敏感系数。考虑到计算过程中气象要素单位、相对大小存在差异, 文中相对敏感系数采用的是

无量纲形式 (马宁等, 2012)。

1.5 通径分析

气象要素的变化不仅会直接影响蒸散量, 还会通过影响其他气象因子间接参与蒸散变化。文中加入通径分析方法, 通过将各因子对实际蒸散量的直接、间接作用定量分离, 弥补敏感性系数评估单一气象因子中的不足, 增加实验结果的对比性。

通径分析 (path analysis) 是 Sewall Wright 最早于 1921 年提出的多元统计方法 (宋小园等, 2016)。在不受自变量本身度量单位和变异程度的影响下, 它可以通过统计学方式, 定量描述各变量作用于因变量的直接、间接效应, 进而分析出自变量对因变量的作用程度及方式, 以及研究各变量之间的相互影响关系 (冯禹等, 2014; 冯禹等, 2016)。当有 n 个自变量, 任意两因子间的作用系数是 r_{ij} 。因子 X_i 对因变量 Y 的作用可分解为直接通径系数 (P_{iy}) 与所有间接通径系数 ($\sum_{j=i+1}^n r_{ij} \times P_{jy}$) 之和 (图 1)。(程新意等, 1990; 杜家菊等, 2010; 杜鹃, 2012; 范文波等, 2012)。

2 结果与分析

2.1 全生育期稻田实际蒸散量与 FAO 估算值对比

将水稻全生育期划分为移栽-分蘖期、拔节-孕穗期、抽穗-乳熟期以及成熟-收获期这四个时段, 并引入 MAE (平均绝对误差)、 MRE (平均相对误差)、 ME (平均误差) 和 $RMSE$ (标准误差) 作为指标 (杨桂元等, 2003)。

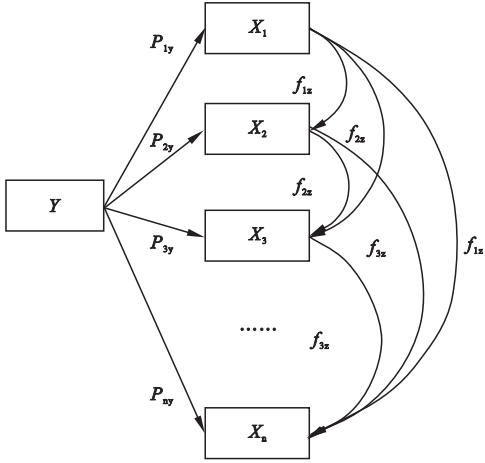


图 1 自变量与因变量之间的通径分析
Fig.1 The graph of path analysis between independent variables and dependent variable

表 2 全生育期稻田实际蒸散量与 FAO-PM 估算值对比分析
Table 2 Comparative analysis between the ET_{PM} and measured ET_a in the growth period

生育期	ET (mm)	ET_{PM} (mm)	MAE (mm)	MRE (%)	ME	$RMSE$
移栽-分蘖期	96.91	101.98	5.06	5.23	0.88	0.76
拔节-孕穗期	88.07	81.94	-6.12	-6.95	0.80	0.32
抽穗-乳熟期	52.70	58.26	5.55	10.54	0.94	0.46
成熟-收获期	52.92	58.85	5.93	11.20	0.50	0.35
全生育期	290.61	301.03	10.42	3.59	0.77	0.49

对这 4 个时段的稻田实测蒸散值与估算值进行对比。经过作物系数修订后的计算值和实测值的拟合效果较好,拟合度由 0.798 提升到了 0.885,数值散点在 1 : 1 线周围分布较为均一(图 2)。对整个生育期而言,蒸散实测总值为 290.6 mm,FAO 蒸散估算值为 301.0 mm。(表 2)各时期估算值之间高低值相互弥补,整体蒸散计算偏高了 3.59%, ME 值为 0.77, $RMSE$ 值为 0.49,计算值与实测蒸散值之间的偏离程度较小,这也为之后的敏感性分析提供了可信的数据基础。

2.2 稻田蒸散变化特征

通过蒸散的时、日变化特征来研究蒸散规律,是微观角度上定量描述蒸散的重要基础(Webb *et al.*, 1980)。

选取水稻生长季内典型晴天(9 月 10 日)与阴天(9 月 12 日)分析稻田蒸散的逐小时分布特征。一天中稻田逐时蒸散总体遵循倒“U”单峰型变化规律,其差别主要来源于作物生理活动和气象因子变化。晴天蒸散的逐时变化与平均气温、净辐射具有相似峰型,时间略有差异,这可能是农田能量传输需要时间以及正午温度较高叶片气孔关闭等原因所导

致。阴天气温与净辐射变化平缓时,逐时蒸散变化也较为平稳。不同天气下,稻田逐时蒸散量的变化均与气温、净辐射的变化具有较好的一致性(图 3)。

通过将每天的逐时蒸散累积求得全生育期内的逐日蒸散。全生育期内逐日蒸散整体呈现先增加后逐渐减小的趋势,高峰期出现在 7、8 月,即水稻的分蘖中后期。高蒸散时期空气温度较高且太阳辐射强烈,低蒸散期即水稻的收获时期时情况则相反。与逐时尺度相类似,实际蒸散同日平均气温、净辐射的变化也都表现出相似的动态趋势(图 4)。

2.3 稻田蒸散与气象要素的定量关系

2.3.1 实际蒸散对气象要素的敏感性 选择平均气温(T_{mean})、最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})、净辐射(R_n)、风速(U)、相对湿度(RH)6 个气象因子作为敏感度分析的对象(表 3)。逐日尺度上除 RH 外, T_{mean} 、 T_{max} 、 T_{min} 、 R_n 、 U 的敏感系数均为正值,表明实际蒸散与这五个气象要素呈正相关性。敏感系数绝对值的大小反映了不同气象要素对实际蒸散的影响程度。日尺度上实际蒸散对 T_{mean} 、 R_n 最为敏感,其次为 RH 和 T_{max} ,对 T_{min} 和 U 的敏感系数最低。

由逐日尺度降为逐时尺度后,除 RH 与 T_{min} ,其

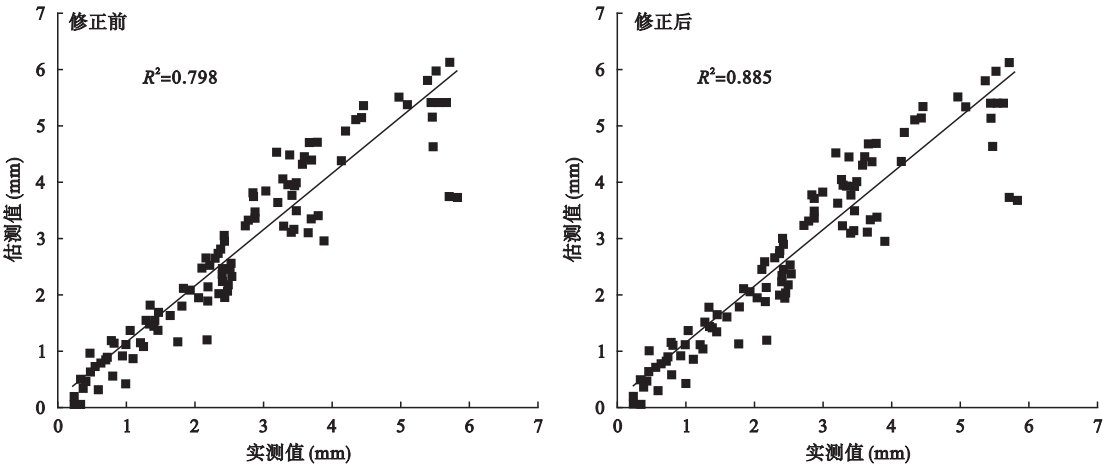


图 2 作物系数修正前后实际蒸散量与 FAO-PM 估算值的对比
Fig.2 Comparison of the ET_{PM} and measured ET_a before and after crop coefficient correction

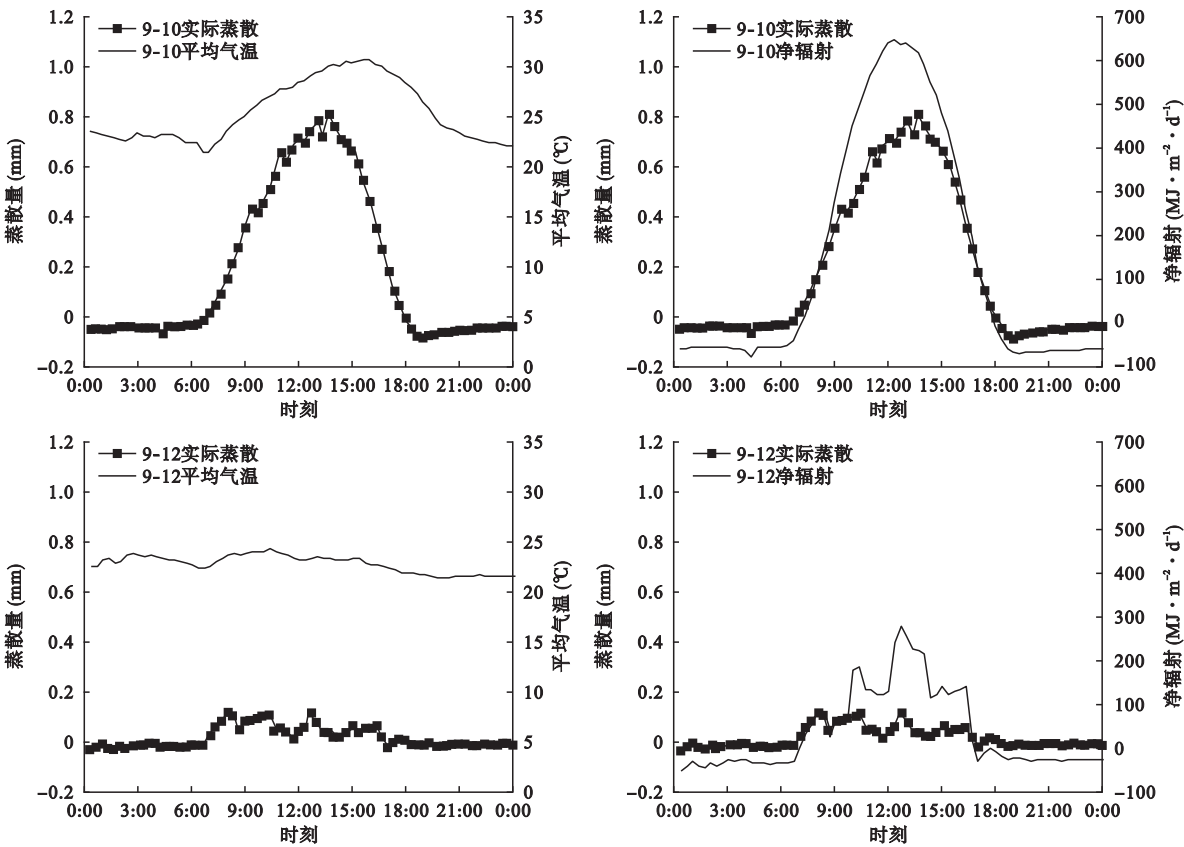


图 3 典型天气逐时蒸散与气温、辐射变化图
Fig.3 Changes between hourly evapotranspiration and temperature, radiation on typical weathers

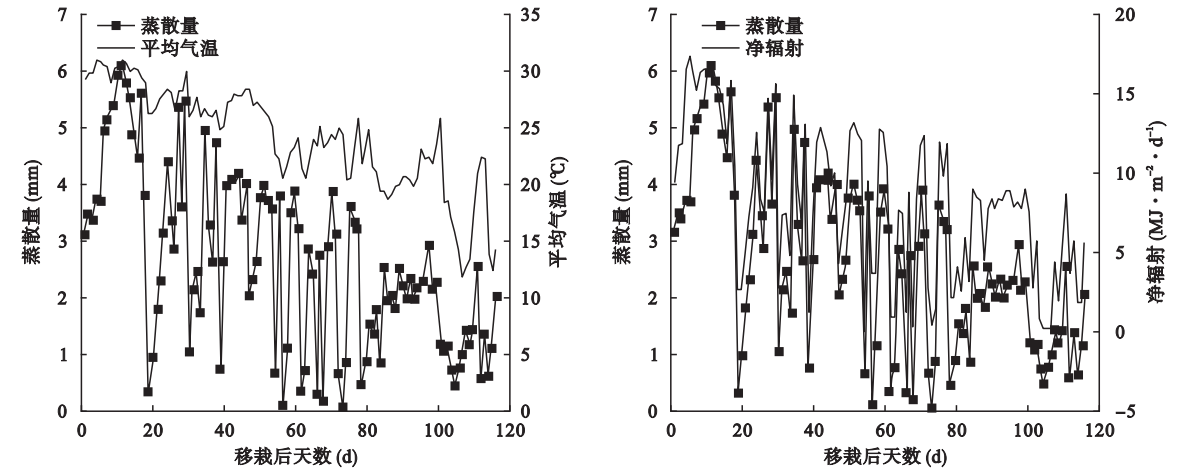


图 4 全生育期逐日蒸散与气温、辐射变化图
Fig.4 Changes between daily evapotranspiration and temperature, radiation on whole growth stages

余各因子的敏感系数均不同程度地减小。 RH 的敏感系数绝对值由 0.6123 增至 0.8240, 系数方向仍为负, 说明无论逐时、逐日尺度, RH 变化均具有较强的负敏感性, 降尺度后甚至超过了 R_n 。 T_{mean} 在逐时、逐日尺度上均有较高的正敏感性, 降尺度后降至 0.8482, 但仍是敏感系数最大的气象因子。Beven 公

式的敏感度分析表明, 逐日尺度上实际蒸散对各主要气象因子的敏感系数依次为 $T_{mean} > R_n > RH > T_{max} > T_{min} > U$, 而逐时尺度上则为 $T_{max} > T_{mean} > RH > R_n > T_{min} > U$ 。
2.3.2 实际蒸散与气象要素的通径分析 从表 4 可知, 逐日尺度上 R_n 对实际蒸散的直接作用远高于

表 3 逐时、逐日尺度上各气象因子的敏感系数
Table 3 Sensitivity coefficients of meteorological factors on hourly and daily scales

	日尺度	时尺度
平均气温 T_{mean}	1.0828	0.8482
最高气温 T_{max}	0.5135	0.4257
最低气温 T_{min}	0.254	0.4122
净辐射 R_n	0.8133	0.6068
风速 U	0.2321	0.0359
相对湿度 RH	-0.6123	-0.824

其他气象因子(通径系数 $P=0.8734$), 同时 T_{mean} 对实际蒸散的通径系数与总贡献系数均在指标中位列第 2, 表明逐日尺度上, R_n 与 T_{mean} 均是对实际蒸散作用较大的气象因子。 T_{max} 对实际蒸散的直接作用较小 ($P=-0.1606$), 主要通过其他气象因子间接作用于实际蒸散, T_{max} 通过 R_n 路径作用于实际蒸散的间接作用系数, 占到了其总间接作用系数的 70.7%。 T_{min} 、 U 对实际蒸散的直接、间接影响都相对要弱。 RH 对实际蒸散量有明显的反作用, 其通过其他因子特别是 R_n 的相关作用进一步对蒸散产生间接作用(间接通径系数和为 -0.7578)。 综合通径分析的结果认为, 逐日尺度上影响稻田实际蒸散的主要因子为 R_n 、 RH 与 T_{max} 。 同时各气象因子间存在相互的制约、影响, 最终对实际蒸散起到了综合性的作用效果。

表 4 逐日尺度上气象因子对实际蒸散量的通径分析
Table 4 Path analysis between meteorological factors and actual crop evapotranspiration (ET_a) on daily scale

气象因子	通径系数	间接作用							总贡献
		平均气温 T_{mean}	最高气温 T_{max}	最低气温 T_{min}	净辐射 R_n	风速 U	相对湿度 RH	间接和 Sum	
T_{mean}	0.1847		-0.1504	0.0273	0.5690	0.0287	0.0509	0.5255	0.7101
T_{max}	-0.1606	0.1730		0.0226	0.7022	0.0249	0.0702	0.9929	0.8324
T_{min}	0.0290	0.1744	-0.1254		0.3752	0.0273	0.0241	0.4755	0.5045
R_n	0.8734	0.1203	-0.1291	0.0124		0.0260	0.0890	0.1187	0.9920
U	0.1066	0.0497	-0.0375	0.0074	0.2129		0.0396	0.2722	0.3788
RH	-0.1066	-0.0882	0.1057	-0.0065	-0.7291	-0.0396		-0.7578	-0.8644

表 5 逐时尺度上气象因子对实际蒸散量的通径分析
Table 5 Path analysis between meteorological factors and actual crop evapotranspiration (ET_a) on hourly scale

气象因子	通径系数	间接作用							总贡献
		平均气温 T_{mean}	最高气温 T_{max}	最低气温 T_{min}	净辐射 R_n	风速 U	相对湿度 RH	间接和 Sum	
T_{mean}	0.2846		-0.2310	-0.0127	0.4807	-0.0070	-0.0081	0.2219	0.5065
T_{max}	-0.2316	0.2839		-0.0127	0.4975	-0.0070	-0.0082	0.7536	0.5220
T_{min}	-0.0127	0.2835	-0.2304		0.5117	-0.0072	-0.0080	0.5495	0.5368
R_n	0.9826	0.1392	-0.1172	-0.0066		-0.0108	-0.0089	-0.0043	0.9783
U	-0.0213	0.0932	-0.0762	-0.0043	0.4984		-0.0062	0.5049	0.4836
RH	0.0128	-0.1804	0.1473	0.0080	-0.6805	0.0104		-0.6954	-0.6825

相比于逐日尺度, 逐时尺度上各气象因子的数据会由于极值的增多而具有相对的不稳定性。 R_n 的影响程度相对于其他气象因子仍优势明显, 但对实际蒸散的总贡献作用系数有所下降。 T_{max} 通过 T_{mean} 路径对实际蒸散的间接作用系数为 0.2839, 占其总间接作用系数的 37.7%。 T_{min} 通过 T_{mean} 路径对实际蒸散的间接作用系数占比也从 17.1% 上升至 50.1%。 相比于逐日尺度, T_{min} 与 T_{max} 在逐时尺度上对 T_{mean} 的影响更为明显, 且通过这一影响更积极地间接参与蒸散变化。 逐时尺度上 U 对实际蒸散的作用效果有所提升, 主要是由于其增加了其他因子对实际蒸散的间接作用所致。 降尺度后 RH 的直接作用系数变为 0.0128, 说明逐时尺度上 RH 的增加并没有对实际蒸散产生太大的直接影响, 但是其对其他气象因子的间接作用不容忽视, 使之依然为该尺度上实际蒸散的重要影响因子。

3 讨 论

本文低丘红壤区稻田实际蒸散的逐时、逐日变化特征, 与戴平等(2015)、刘笑吟等(2016) 此前的研究结果相一致。 采用 PM 公式估算红壤地区稻田的实际蒸散取得了较好效果。 贾志军等(2014) 认为, 稻田开阔均质、下垫面水分充足, 这使得 PM 模型对实际蒸散的估算精度较高, 但这并不意味着不

存在误差。对于稻田而言,全生育期内逐日作物系数波动性明显,实际应用中应对 FAO 所推荐的标准作物系数进行校正(雷志栋等,1999;王笑影等,2005;Yang *et al.*,2016)。本研究中,利用实测气象数据与 LAI 对作物系数进行了改进,修正后的估算值与实测值之间的拟合效果更好,拟合度由 0.798 提升至 0.885,相对误差范围也完全可以满足实际需要。

本文在了解低丘红壤区稻田实际蒸散特征的基础上,首次将敏感性分析与通径分析结合,对小尺度实际蒸散的各影响因子进行了定量分析。综合两种分析结果来看,净辐射、相对湿度是影响该稻区实际蒸散的主要气象因素。平均气温、最高气温、最低气温次之,风速对实际蒸散的影响则较小。比较以往文献,本研究中各气象要素的敏感系数普遍较高。Liu 等(2013)、魏新光等(2014)认为,提升时间尺度会突出作物自身生理状况对蒸散的作用效果,削弱气象因子的作用。前人研究中,气象要素敏感性通常以年变化、年际变化为主,因而将时间尺度缩至逐时、逐日尺度时,气象因子与蒸散之间的敏感关系反而更为明显。通径分析此前多被单独应用于地区或是流域的潜在蒸散研究(范文波,2012;杨林山,2014;汪精海,2017)。本研究发现,除平均气温以外,其他气象因子的通径分析结果均与敏感性分析结果具有较好的一致性,这说明通径分析对气象因子的定量分析可以被尝试应用于小时间尺度的蒸散研究中。此外,通径分析表明,净辐射不仅对实际蒸散有强烈的直接作用影响,温度与相对湿度等因子还会通过净辐射路径对蒸散产生不可忽视的间接影响。这进一步说明辐射项对农田蒸散变化的重要影响作用。同时,最高气温、最低气温通过影响平均气温而对实际蒸散产生的间接作用大致占到了其各自总间接作用的 20%~50%。这也从侧面说明敏感性分析在多参数变动时具有一定的局限性,温度因子间较强的关联性会使之高估了平均温度对实际蒸散的影响。

实验过程并未考虑降水和土壤水分因素,原因基于研究区的气候特征与灌溉条件。水稻生长季内高温少雨,田间保持间歇性灌水。因此,下垫面湿润且无水分胁迫,降水并不是农田水分的主要输入项。也有学者认为,灌溉稻田的降水量并不直接决定蒸散量的变化。降水发生时蒸散值的下降原因主要来源于空气温度、湿度的迅速下降以及净辐射量的减少,同时不乏连续降水影响仪器精度的可能性(景桂洪

等,2016;花圣卓等,2016)。后续研究应增加不同下垫面类型、水分条件的对比,以此增加实验内容的全面性与普适性。除此之外,为考虑作物生理特性、土壤物理特性以及植被生育期等多因素的综合影响效果,未来研究应添加生物、土壤因子等方面对蒸散作用的定量研究。与此同时,在得到蒸散影响因子的敏感性系数与通径系数的基础上,如何进一步模拟未来小尺度的蒸散量变化也是接下来的研究方向。这不仅对小流域农业水资源精细化管理具有重要意义,同时也为区域水热平衡变化研究以及气候变化对区域水文循环的影响研究提供一定的数据支持。

4 结 论

低丘红壤区稻田的全生育期蒸散实测值为 290.61 mm,经过作物系数修订后的 FAO 蒸散估算值为 301.0 mm,估算值较实测值偏高了 3.59%。各生育期的蒸散值具有差异性,移栽-分蘖期实测蒸散量最大,为 96.9 mm,占全生育期蒸散量的 33.3%。

低丘红壤区稻田具有典型的逐时、逐日变化特征。典型天气蒸散逐时动态变化遵循“早晚低、中午高”的单峰型变化规律。天气条件与生长时期的变化会对其产生一定的影响。全生育期逐日蒸散整体呈现先增加后逐渐减小的趋势,高峰期出现在 7、8 月的分蘖中后期。逐时、逐日尺度上,稻田蒸散量的变化均与气温、净辐射的变化具有较好的一致性。

通径分析与 Beven 敏感性分析相结合的方法在研究小尺度农田蒸散影响因子上取得了较好效果,两种方法的结果具有相似性,尤以逐日尺度较为显著。由逐日尺度降为逐时尺度会削弱各气象因子对实际蒸散量的影响效果。低丘红壤区稻田实际蒸散对各气象因子的响应程度有明显差异,净辐射和相对湿度同时具有较高的总贡献系数和敏感性系数,因而成为该区域实际蒸散量变化的主要影响因素。其次是 3 个温度指标,而风速的影响最小。除平均相对湿度外,平均气温、最高气温、最低气温、净辐射通量、2 m 处风速均对实际蒸散起正向作用。相比于敏感性分析,通径分析具有可分离出多种气象因子对蒸散的直接、间接作用的优点。平均温度对蒸散的影响会受最高气温、最低气温路径对蒸散的间接影响,因此平均温度的敏感性结果可能比实际偏高。

参考文献

曾丽红,宋开山,张 柏,等. 2010. 2000 年至 2008 年松嫩

- 平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析. 资源科学, **32**(12): 2305–2315.
- 程新意, 李绍疆. 1990. 通径分析的数学模型. 大学数学, (4): 99–105.
- 戴平, 李涵茂, 方丽, 等. 2015. 双季晚稻农田蒸散量估算研究. 江西农业学报, **27**(11): 73–76.
- 杜家菊, 陈志伟. 2010. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, **45**(2): 4–6.
- 杜鹏. 2012. 通径分析在 Excel 和 SPSS 中的实现. 陕西气象, (1): 15–18.
- 范文波, 吴普特, 韩志全, 等. 2012. 玛纳斯河流域 ET_0 影响因素分析及对 Hargreaves 法的修正. 农业工程学报, **28**(8): 19–24.
- 冯禹, 崔宁博, 龚道枝. 2016. 机器学习算法和 Hargreaves 模型在四川盆地 ET_0 计算中的比较. 中国农业气象, **37**(4): 415–421.
- 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 2014. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析. 农业工程学报, **30**(14): 78–86, 339.
- 高磊, 申双和, 邵立瑛, 等. 2016. 水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算. 中国农业气象, **37**(2): 158–165.
- 花圣卓, 蔡昕, 余新晓. 2016. 平坦下垫面植被蒸散特征及对气象因素的响应研究. 水土保持学报, **30**(3): 344–350, 354.
- 贾红. 2008. 稻田双源蒸散模型研究(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.
- 贾志军, 韩琳, 王鸽, 等. 2014. 三江平原典型下垫面 FAO Penman-Monteith 模型适用性分析. 应用生态学报, **25**(5): 1327–1334.
- 景桂洪, 元元书, 贾秋洪. 2016. 低丘红壤区旱田水热通量特征及其气象影响因素. 中国农村水利水电, (1): 44–50.
- 雷志栋, 罗毅, 杨诗秀, 等. 1999. 利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨. 农业工程学报, **15**(3): 119–122.
- 刘斌. 2015. 南京地区稻田水热通量监测与模拟(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.
- 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 2009. 海河流域潜在蒸散的气候敏感性分析. 资源科学, **31**(9): 1470–1476.
- 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 2016. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析. 农业机械学报, **47**(8): 91–100, 170.
- 刘钰, Pereira LS. 2000. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. 农业工程学报, **16**(5): 26–30.
- 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 等. 2012. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析. 自然资源学报, **27**(6): 975–989.
- 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 等. 2007. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证. 农业工程学报, **23**(7): 30–34.
- 宋小园, 朱仲元, 刘艳伟, 等. 2016. 通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现. 干旱区研究, **33**(1): 108–113.
- 汪精海, 齐广平, 康燕霞, 等. 2017. 黑河流域潜在蒸散及其影响因素的不确定性分析. 生态学杂志, **36**(1): 172–180.
- 王笑影, 梁文举, 闻大中. 2005. 北方稻田蒸散需水分析及其作物系数确定. 应用生态学报, **16**(1): 69–72.
- 魏新光, 陈滇豫, 汪星, 等. 2014. 山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应. 农业工程学报, **30**(17): 149–156.
- 吴荣军, 邢晓勇. 2016. 不同植被条件下实际蒸散的变化特征及其影响因子——以淮河流域为例. 应用生态学报, **27**(6): 1727–1736.
- 杨桂元, 王军. 2003. 对预测模型误差的分析——相对误差与绝对误差. 统计与信息论坛, **18**(4): 21–24.
- 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 2014. 洮河流域潜在蒸散的气候敏感性分析. 农业工程学报, **30**(11): 102–109.
- Gong L, Xu C, Chen D, et al. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, **329**: 620–629.
- Hu S, Zhao C, Li J, et al. 2014. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. *Hydrological Processes*, **28**: 4506–4510.
- Liu SY, Wang YK, Wei XD, et al. 2013. Measured and estimated evapotranspiration of jujube (*Ziziphus jujuba*) forests in the Loess Plateau, China. *International Journal of Agriculture & Biology*, **15**: 811–819.
- Liu X, Zheng H, Zhang M, et al. 2011. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, **21**: 594–608.
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106**: 85–100.
- Yang Y, Cui Y, Luo Y, et al. 2016. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Penman-Monteith model and public weather forecasts. *Agricultural Water Management*, **177**: 329–339.

作者简介 李谦, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 研究方向为农业气象与生态环境气象. E-mail: 18751975606@163.com
责任编辑 李凤芹