

不同土壤水分能量及气象因子对水稻腾发量的影响

陈伟¹, 迟道才^{1*}, 张旭东¹, 郇恩博², 陈涛涛¹, 张特男¹, 吴秀明¹

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁省水利水电科学研究院, 沈阳 110003)

摘要: 采用盆栽试验, 探讨了不同土壤水分能量和气象因子对水稻腾发量的影响。在水稻的不同生育阶段进行不同程度的土壤水分能量调控, 分析受控生育阶段水稻腾发量的变化及其对产量的影响, 及受控生育阶段内腾发量的典型日变化规律; 利用典型日内充分供水条件下的腾发量数据及相应时段的气象资料, 通过逐步回归建立了多元线性回归模型。结果表明: 不同生育阶段土壤水分能量调控, 对水稻腾发量影响趋势相同, 但对产量影响趋势不同; 晴天时各处理腾发量强度曲线呈明显的单峰变化, 阴天时则无明显规律; 诸气象因子中总辐射强度、相对湿度和风速进入了逐步回归模型。在气象因子相同的情况下, 腾发量的大小由各处理的土壤水分能量大小决定; 相同土壤水分能量下, 在水稻腾发量中起主要作用的气象因子是辐射强度、相对湿度和风速。

关键词: 土壤水分能量; 气象因子; 水稻腾发量; 日变化; 逐步回归

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2011)04-0465-05

Effect of Different Soil Water Potentials and Meteorological Factors on Evapotranspiration of Rice

CHEN Wei¹, CHI Dao-cai^{1*}, ZHANG Xu-dong¹, TAI En-bo², CHEN Tao-tao¹,

ZHANG Te-nan¹, WU Xiu-ming¹

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Water Conservancy and Hydropower Science Research Institute of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to determine the influence of rice evapotranspiration caused by different status of soil water potential and meteorological factors. The variation of rice evapotranspiration and the effects on yield were researched in soil water potential controlling stage. The diurnal variation law of rice evapotranspiration in a typical day in controlling stage also was measured. Multivariate linear models were established by stepwise regression based on the meteorological datum and the data of evapotranspiration in a typical day under flood irrigation. The result showed that different soil water potential had a same influence trend for rice evapotranspiration, but had a dissimilar influence trend for rice yield. Evapotranspiration intensity curve of each treatment had a obvious peak value in a sunny day, but had no obvious rule in a cloudy day. Some meteorological factors including global radiation intensity, relative humidity, and wind speed were kept in the stepwise regression model. Evapotranspiration was influenced by the value of soil water potential in the same meteorological condition; global radiation intensity, relative humidity, and wind speed were meteorological factors which played a leading role in rice evapotranspiration under the same soil water potential.

Key words: soil water potential; meteorological factors; rice evapotranspiration rate; diurnal variation law; stepwise regression

随着农业水资源的日益紧缺, 减少作物耗水以实现节水农业的各项理论和技术研究受到了广泛重视^[1], 而作物腾发量(ET)是作物耗水的主要组成部分, 也是确定节水高效灌溉制度、制定灌溉排水规划和水资源合理配置必不可少的重要参数^[2-3]。已有的作物腾发量的研究, 较多的是基于常规气象资料计算参考作物腾发量, 进而对作物腾发量进行预报^[4-8]; 也有学者对实际作物腾发量同气象因子的关系进行了研究^[9-10], 但一般是基于长时段(几天或几十天)内的平均值。目前, 对单日内腾发量及其与气象因子之间的关系进行研究的并不多, 随着气象观测设备的不断发展, 准确观测短时段内的气象数据已不再困难。

在主要粮食作物之中, 水稻的耗水量最大, 原因是稻田的水分消耗不但有蒸腾和棵间蒸发, 还有相当多的渗漏, 除轻壤土等渗漏量特高的稻田外, 一般蒸腾、棵间蒸发与渗漏约分别占总耗水量的 40%~50%、15%~25%

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室项目(2009S091); 辽宁省自然科学基金项目(20082122); 辽宁省重大项目(2008NY01); 辽宁省科技厅农业攻关重大项目(2008212003)

作者简介: 陈伟(1984-), 男, 沈阳农业大学博士研究生, 从事节水灌溉理论与技术研究。* 通讯作者 Corresponding author: 迟道才(1964-), 男, 沈阳农业大学教授, 博士, 从事节水灌溉理论与技术研究。

和25%~40%^[11]。本研究采用无渗漏的盆栽试验,准确测定了水稻的腾发量,对不同生育阶段进行不同土壤水分能量调控,研究受控生育阶段典型的腾发量日变化规律及其对产量的影响,分析了充分供水条件下单日内气象因子对水稻腾发强度的影响,建立了逐步多元回归方程,比较了气象因子对水面蒸发,水稻蒸腾及腾发量的影响程度,为水稻的节水灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2010年在辽宁省灌溉试验中心站(位于辽宁省沈阳市黄家乡,为平原地带,属温带大陆性季风气候,地里位置E120°30'44",N42°08'59",海拔47m)进行。2010年5月23日~9月15日的积温为2624.6℃,日平均最高温度26.8℃,日平均最低温度14.8℃,日照时数803.935h,降雨量731mm。供试土壤为粘壤土,容重 $1.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤孔隙率为42.2%,土壤肥力偏下,速效钾 $81.04\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $18.27\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤碱解氮 $75.02\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.07\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质1.19%,土壤pH值为7.5。

水稻供试品种采用沈阳当地普遍种植的中稻“辽星9号”。

1.2 方法

试验于2010年5月24日插秧,9月16日收割,本田生育期115d。试验的盆栽容器为塑料桶(高30cm,内径30cm),桶内填过筛后的壤土,每桶种水稻1穴,基本苗4株,试验区在下雨时用电动不锈钢式防雨棚遮挡。由量筒控制灌溉水量,并且每日08:00对各处理称重,测定腾发量。采用水银负压计测定每个容器内的土壤水吸力变化。气象数据由设在试验区北侧的自动气象观测设备来观测,可测气温、湿度、降雨量、日照时数、风速、辐射强度等。根据水稻不同生育期的耐旱能力,分别在分蘖前期(A₁、A₂、A₃)、分蘖末期(B₁、B₂、B₃)、拔节孕穗期(C₁、C₂、C₃)、抽穗开花期(D₁、D₂、D₃)、乳熟期(E₁、E₂、E₃)进行土壤水分能量调控,以不同的土壤水吸力作为灌水下限,超过下限开始灌水,各处理控水时期及具体控制下限如表1。共15个受旱处理,对照处理(CK)全生育期保护浅水淹灌,受旱处理的非受旱阶段保持淹灌同CK。此外,另设一组处理测量同面积水面蒸发,即用相同规格的容器填装相同的土壤,不种水稻,在全生育期保持水层。所有处理重复3次。试验的田间管理及施肥标准参照当地农户,依次追施底肥(尿素 $112.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,复合肥 $450\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),分蘖肥(尿素 $300\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),拔节肥(尿素 $150\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),穗肥(尿素 $60\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。试验数据采用统计方法进行分析。秋收时考种,项目包括有效穗数、穗长、结实率、千粒重和稻谷重。每个容器均单收单打并单独计算产量。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分能量对各生育阶段腾发量ET及产量的影响

由表1可知,A1的ET减少11.9%,增产最多,达到12.1%;A2的ET减少18.79%,增产5.9%;但A3的ET减少24.24%,产量下降了4.1%,说明在分蘖前期水稻腾发量下降20%以上会减产;方差分析显示受旱水平对分蘖前期ET影响极显著,但对分蘖后期ET影响不显著;拔节孕穗期受旱水平最轻,但对ET的影响是极显著的,随着受旱程度的增加,ET减少率分别为11.36%,11.92%和13.84%,其增产率分别为1.6%,0,-5.6%;同样的受旱水平(5~30kPa),分蘖前期ET要减少20%才会减产,但拔节孕穗期ET减少11.92%就会减产,这也证明拔节孕穗期对水分亏缺的敏感性高于分蘖前期;方差分析显示,受旱水平对抽穗开花期和乳熟期ET的影响也是显著的,但ET减少率与相应的增产率之间无明显的规律,可见,土壤水分能量调控对ET的影响大于对产量的影响。

2.2 不同土壤水分能量下ET的典型日变化

由于在返青和分蘖期植株较小,其蒸发蒸腾量在1~2h内变化不明显,因此本试验分别在拔节、抽穗、乳熟和黄熟4个生育阶段中选择若干天作为典型日,从07:00到18:00或19:00,进行ET日内变化测定,探求这几个生育期内的ET日变化规律(图1)。

对于拔节孕穗期受旱处理,阴天和晴天的ET强度(图1a、b)均呈现出先增后减的单峰趋势,在阴天峰值出现在11:00,之后ET强度均表现为缓慢下降;水面蒸发强度E的峰值出现在13:00,比ET强度峰现时间滞后约2h;对照蒸腾强度Tr峰值出现在10:00,比ET强度峰现值提前大约2h。在晴天中,所有曲线的峰值都出现

表 1 各处理灌水下限、增产率、控制时期 ET 及其方差分析结果

Table 1 Data of water control limit, yield increase rate, evapotranspiration of water controlling stage and results from analysis of variance

控水时期	各处理下限	处理时期 ET/mm	对照 ET/mm	ET 减少率/%	增产率/%	F 值
Water controlling stage	Lower limit of each treatment	ET of control stage	ET of water control period	ET cut rate	Yield increase rate	F test
分蘖前期 Initial tillering stage	A1(5~10kPa)	122.00	138.47	11.90	12.14	63.78**
	A2(15~20kPa)	112.45	138.47	18.79	5.88	
	A3(25~30kPa)	104.90	138.47	24.24	-4.14	
分蘖后期 Late tillering stage	B1(30~35kPa)	46.31	56.02	17.33	5.23	4.04
	B2(40~45kPa)	47.43	56.02	15.33	1.34	
	B3(50~55kPa)	49.54	56.02	11.56	-1.45	
拔节孕穗 Jointing stage	C1(5~10kPa)	347.84	392.40	11.36	1.59	13.65**
	C2(15~20kPa)	345.63	392.40	11.92	0.03	
	C3(25~30kPa)	338.09	392.40	13.84	-5.56	
抽穗开花 Heading stage	D1(5~10kPa)	162.80	188.08	13.44	7.73	6.62*
	D2(20~25kPa)	165.02	188.08	12.26	4.88	
	D3(35~40kPa)	159.31	188.08	15.30	4.91	
乳熟 Milk stage	E1(10~15kPa)	87.21	104.53	16.57	5.35	18.79**
	E2(25~30kPa)	85.24	104.53	18.45	6.47	
	E3(40~45kPa)	85.72	104.53	18.00	11.51	

注: $F_{0.01}=13.65, F_{0.05}=5.41$, * 为显著, ** 为极显著。

Note: $F_{0.01}=13.65, F_{0.05}=5.41$, * significant at 0.05, ** significant at 0.01.

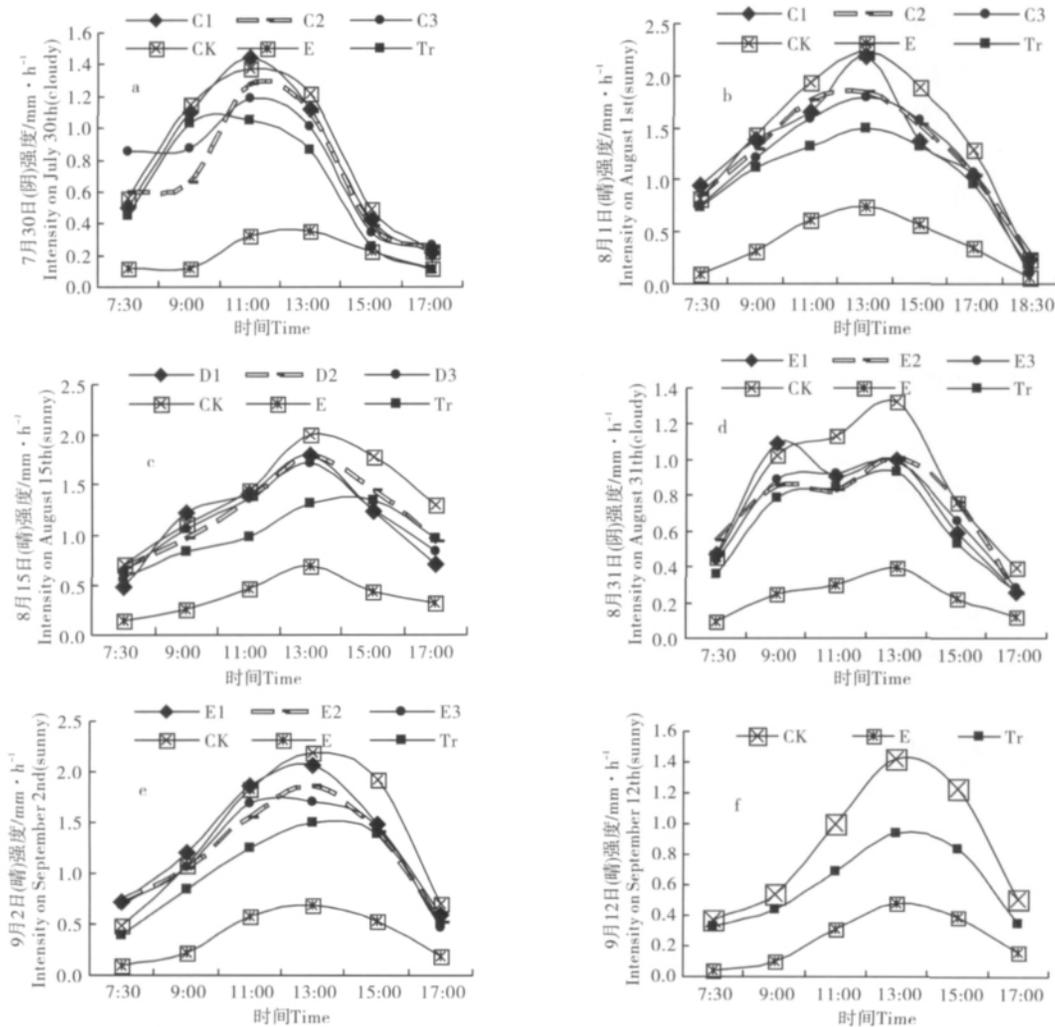


图 1 各生育阶段各处理腾发量(ET)、水面蒸发(E)和对照蒸腾(Tr)强度日变化

Figure 1 Diurnal variation of rice evapotranspiration intensity, evaporation intensity from water surface and transpiration intensity of control treatment in a typical day in each growth stage

在 13:00,不存在提前或滞后现象,且峰值明显高于阴天,土壤水分含量越高峰值越大,ET 强度达到峰值后迅速下降。

抽穗开花期受旱处理 ET 强度变化见图 1c,在晴天时各曲线均为单峰曲线,ET 强度在 11:00 几乎相同,但过了 11:00 以后拉开差距,表现为水分供给越充足强度增加的速度越快,所有曲线在 13:00 达到峰值,其中对对照明显高于其他 3 个处理;对照蒸腾强度 Tr 峰值出现在 14:00,滞后约 1h。

乳熟期受旱 ET 强度变化见图 1d、e,在阴天时,E1、E2 有着明显的双峰变化,峰现时间相同,在 9:00 和 13:00 峰值各出现一次,但 E1 的第一个峰值较大,而 E2 的第二个峰值较大;E3 的 ET 强度也有双峰曲线的趋势,但从 09:00 至 11:00 其 ET 强度并未减少,然后从 11:00 开始增加,在 13:00 达到峰值;对照 ET 强度、蒸腾强度 Tr 以及水面蒸发强度与 E3 表现大体相同;在所有处理当中,对照水分充足,ET 强度峰值最高。在晴天中,所有曲线均为单峰曲线,但峰值出现时间不同,E3 峰现时间最早,在 11:00,而其余曲线峰值都出现在 13:00,并且土壤含水越多,峰值越大,说明气象因子相同条件下,晴天 ET 强度变化的主要影响因素是土壤水分条件。

黄熟期并未进行控水处理,只观测对照处理。由图 1f 可知,黄熟期 ET 强度、对照蒸腾和水面蒸发都呈明显的单峰曲线,于 13:00 到达峰值。

由图 1 可知,晴天时各处理 ET 强度曲线呈明显的单峰变化,峰现时间均大多出现在 13:00,个别重旱处理在 11:00,土壤水分越充足峰值越大,阴天时各处理一般在 09:00 或 11:00 达到峰值,有的在 13:00 出现第二个峰值,大小无明显规律,需进一步研究。水面蒸发的日变化无论阴天或晴天均为峰值在 13:00 的单峰曲线。

2.3 气象因子对水稻腾发量、水面蒸发及蒸腾的影响

为探求主要气象因子对 ET 及水面蒸发 E 的影响,将前述典型日变化中对照 ET、E 及 Tr 强度分别设为因变量,将对应时段内的主要的气象因子(风速 u 、相对湿度 h 、平均水汽压 d 、平均气温 t 、日照时数 s 、总辐射强度 r)作为自变量,利用 SPSS18.0 软件进行多元线性回归分析。已有的研究^[3-4]表明,诸多气象因子均受太阳辐射的影响,所以只需选择几种有代表性的因素即可,本研究采用逐步线性回归法,选择方程及回归系数均满足显著性要求的因素进入模型,结果表明(表 2),腾发强度和水面蒸发强度随总辐射强度和风速的增加而增大,随相对湿度的增大而减小,这 3 个因子是影响腾发强度和水面蒸发强度的主要气象因子。蒸腾强度随着总辐射强度和风速的增大而增大,随平均水汽压的增大而减小。

表 2 Tr、ET 和 E 回归模型及显著性分析

Table 2 Regression models of transpiration, evapotranspiration, evaporation and significant analysis results

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variables	模型 Model	复相关系数 Multiple correlation coefficient	拟合度 R ² Degree of fitting	F 检验值 F-test value	系数显著性 Significant of coefficient
Tr	u, d, r	$Tr=0.155u-0.212d+1.399r+0.563$	0.907	0.822	60.07**	*
ET	u, h, r	$ET=0.231u-0.702h+1.95r+0.602$	0.941	0.885	100.06**	**
E	u, h, r	$E=0.102u-0.373h+0.585r+0.236$	0.944	0.89	105.41**	**

注:*为 $\alpha=0.05$ 水平下显著,**为 $\alpha=0.01$ 水平下显著,模型中各变量单位为:Tr-mm·h⁻¹,ET-mm·h⁻¹,E-mm·h⁻¹, $u-m\cdot s^{-1}$, $d-kPa$, $h-\%$, $r-kW\cdot m^{-2}$ 。

Note: *significant when $\alpha=0.05$,** significant when $\alpha=0.01$, the unit of the variable for the model were as follow: Tr-mm·h⁻¹, ET-mm·h⁻¹, E-mm·h⁻¹, $u-m\cdot s^{-1}$, $d-kPa$, $h-\%$, $r-kW\cdot m^{-2}$ 。

由图 2 可知,从返青到分蘖后期,ET 和水面蒸发以及蒸腾的强度都是不断增大的,这段时间植株个体小,蒸腾少,ET 的增加主要是因为水面蒸发增大,主导因素是气象条件;过了分蘖后期,由气象条件主导的水面蒸发强度一直在减少,但是 ET 强度的变化趋势却与其不同,可见气象因子虽然能影响 ET 强度,但随着植物本身蒸腾作用的加强,气象条件的直接作用减弱了,更多的是通过影响植物蒸腾进而影响 ET,这也是 Tr、ET、E3 个回归方程的拟合度依次上升的原因。

3 结论与讨论

本研究通过对盆栽试验数据的分析表明:各处理在控水时期 ET 与对照相比均有不同程度的减少,分蘖前期 ET 减少 20%以上才会减产,而拔节期 ET 减少 11.92%就会减产,说明拔节孕穗期比分蘖前期对水分亏缺更为敏感;拔节和抽穗这两个时期的 ET 量超过全生育期的 55%。因此,这两个时期是开展水稻节水灌溉研究的

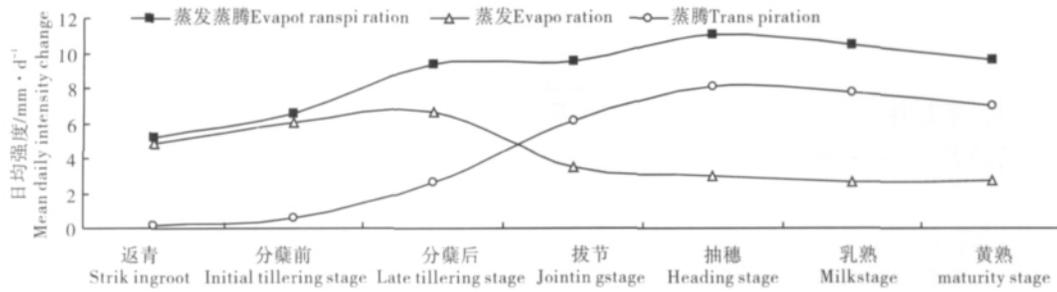


图2 对照各生育阶段 ET、蒸腾 Tr 和水面蒸发 E 日强度变化

Figure 2 Changes of mean daily evapotranspiration, transpiration and evaporation of control in each growth stage

关键时期,尤其是在拔节期,既要控水又不能超过一定的限度,否则会造成严重减产。由本研究的典型日变化现象可知,水稻的腾发强度、蒸腾强度在一昼夜内基本上随水分条件和气象条件而变化,各处理每日的腾发量主要随当日的气象因子而变化,在气象因子相同的情况下,腾发量的大小由各处理的土壤水分能量大小决定,土壤水分能量越高,即水吸力越大,则腾发量就越小。

ET强度的典型日变化表明在分蘖期以前,气象因子是影响ET的主要原因,分蘖期后,气象因子只能通过影响植物蒸腾间接影响ET;虽然回归分析显示总辐射强度、相对湿度和风速是影响腾发强度和水面蒸发强度的主要气象因子,但这并不意味着其他气象因子与此无关,例如,气温和平均水汽压也是影响腾发量的重要因素,但气温的变化主要是由总辐射强度引起,而相对湿度与平均水汽压密切相关,可见,进入方程的3个因子可以解释腾发量的绝大部分变化,并且各自变量的系数绝对值大小反映了各气象因子的重要程度,系数越大,该气象因子在因变量变化中所起的作用越大。

参考文献:

- [1] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元.现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J].农业工程学报,2004,20(1):1-4.
- [2] 于 婵,朝伦巴根,高瑞忠,等.作物需水量模拟计算结果有效性检验[J].农业工程学报,2009,25(12):13-21.
- [3] 蔡甲冰,许 迪,刘 钰.冬小麦返青后作物腾发量的尺度效应及其转换研究[J].水利学报,2010,41(7):862-869.
- [4] GOWING J W, EJIEJI C J. Real time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short-term weather forecasts[J].Agricultural Water Management,2001,47:137-153.
- [5] CAI J B, MU J X. Estimation of daily reference evapotranspiration from weather forecast messages [C]//Proceeding CD of ICID 21st European Regional Conference. Frankfurt(Oder) and Sluice Germany and Poland,2005:15-19.
- [6] 付 强,王立坤,王兆菡.井灌水稻需水量预测的人工神经网络模型研究[J].灌溉排水,2002,21(1):29-32.
- [7] 蔡甲冰,刘 钰,雷廷武,等.根据天气预报估算参照腾发量[J].农业工程学报,2005,21(11):11-15.
- [8] 蔡甲冰,刘 钰,雷廷武,等.根据天气预报估算参照腾发量的模糊神经网络方法[J].农业工程学报,2005,21(12):108-111.
- [9] 付 强,王志良,梁 川,等.基于偏最小二乘回归的水稻腾发量建模[J].农业工程学报,2002,18(6):9-12.
- [10] 迟道才,王殿武.北方水稻节水理论与实践[M].北京:中国农业科学技术出版社,2003.
- [11] 茆 智.水稻节水灌溉及其对环境的影响[J].中国工程科学,2002,4(7):8-16.

[责任编辑 亓 国]