

## 区域农业逐日需水量估算方法研究

毕宏伟, 陈玺, 戴明龙 (长江水利委员会水文局, 湖北武汉 430010)

**摘要** 从作物生长周期需水的角度提出了逐日农业需水量的计算方法, 并对我国日均农业需水量进行了估算。结果表明: 东北平原、华北平原、长江中下游平原区是我国农业需水量最高的集中区, 大部分地区日均农业需水量为 100 万~500 万 m<sup>3</sup>, 部分地区甚至超过 500 万 m<sup>3</sup>; 华南地区大部分地区的日均农业需水量为 200 万~500 万 m<sup>3</sup>, 部分地区超过 500 万 m<sup>3</sup>; 新疆的日均农业需水量也达到 100 万 m<sup>3</sup>。

**关键词** 农业需水量; 潜在蒸散发; 作物系数; 生长周期

**中图分类号** S27 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)30-0046-04

## Estimation Method for Daily Regional Agricultural Water Demand

**BI Hong-wei, CHEN Xi, DAI Ming-long** (Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010)

**Abstract** Calculation method for daily agricultural water demand was put forward from the aspects of water demand of crop growing period. The daily agricultural water demand in China was estimated. Results showed that Northeast China Plain, North China Plain and middle and lower reaches of the Yangtze River plain were the concentration areas of agricultural water demand in China. Daily agricultural water demand in most areas was 1 million-5 million m<sup>3</sup>, and in some areas even exceeded 5 million m<sup>3</sup>. Daily agricultural water demand in most areas of South China was 2 million-5 million m<sup>3</sup>, and in some areas even exceeded 5 million m<sup>3</sup>. Daily agricultural water demand in Xinjiang reached 1 million m<sup>3</sup>.

**Key words** Agricultural water demand; Potential evapotranspiration; Crop coefficient; Growth cycle

作物在生长发育期间消耗的水量为作物需水量, 某种作物的需水量是指当其他耕作条件一定时, 作物达到计划产量时的需水量。具体来讲, 旱田作物的需水量即作物的蒸腾量和田间水面蒸发量(土壤蒸发)之和, 即腾发量; 水田作物的需水量即作物蒸腾量、田间水面蒸发量和稻田地下渗漏量之和。它是确定作物灌溉制度、制订排灌规划、实施农田排灌的重要依据。不同类别作物, 同类作物不同品种, 同品种作物的不同生长期和不同生产水平, 不同水文年份的需水量都不同。因此, 它既与作物本身的特性、耕作措施、施肥水平、产量水平有关, 还受气象条件和土壤条件的影响, 因而同种作物有地区和水文年份的差别, 并非一个固定值。学者可以根据气象资料, 采用彭曼法对区域主要农作物的需水量进行分时、分区的计算, 提出不同保证率年份的需水量规律, 以充分发挥灌溉工程效益, 指导并加速项目区灌溉农业的发展。考虑到农作物或植物生育期吸收大气水、降水、土壤水等, 因此研究者在农业用水资源的配置过程中不仅仅要考虑径流性水资源。王浩院士曾经指出, 仅仅考虑农业灌溉用水, 全国农业用水量约为 3 600 亿 m<sup>3</sup>, 而考虑到作物生育周期内可以利用的所有水分, 全国农业用水量将会超过 7 000 亿 m<sup>3</sup>。笔者从作物需水的角度计算农业需水量, 旨在为更好地服务于农业灌溉制度及减少农业灌溉用水量提供基础数据。

## 1 研究方法

**1.1 农业需水量计算** 区域内各种农作物生育期需水量的计算要用到作物不同生长阶段的需水系数( $K_c$ )和参考作物蒸发量( $ET_0$ ), 计算方法如下:

$$Ag_{j,t} = \sum_{m=1}^n K_{c_{m,t}} \times ET_{0,j,t} \times a_{j,m} \quad (1)$$

式中,  $K_{c_{m,t}}$  是作物  $m$  在生育期第  $t$  天的需水系数, 是作物  $m$

在理想状况下的实际蒸散发量( $ET_a$ )与参考作物蒸散发量( $ET_0$ )的比值, 反映作物不同生育阶段的需水量, 是根据当地气候条件得出的经验值<sup>[1]</sup>;  $a_{j,m}$  是第  $j$  个分区作物  $m$  的种植面积。

**1.2 潜在蒸散发计算** 潜在蒸散发是表征一个地区充分供水情况下的区域蒸散发能力, 是进行作物需水量估算、农田灌溉管理及稀缺资料地区水量平衡等研究中至关重要的参量, 也是衡量地区是否缺水的重要基础数据之一<sup>[2-3]</sup>。准确地估算潜在蒸散发对能量平衡和水量平衡研究具有重要意义<sup>[4]</sup>。目前, 用于计算潜在蒸散发的方法有多种, 包括彭曼公式法、温度估计法、水平衡法等。由于彭曼公式反映了区域各种气候要素的综合影响, 在实际应用过程中计算结果较为合理准确, 而其他方法是在气象资料受限情况下发展出来的简化方法, 虽然简单易用, 但结果准确性略微偏低<sup>[4]</sup>。因此, 笔者应用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的彭曼公式法。彭曼公式逐日参考作物蒸发蒸腾量计算共 7 个步骤:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (2)$$

式中,

$$(1) \Delta = \frac{4.098e^0(T_{mean})}{(273.3 + T_{mean})^2}$$

$$e^0(T_{mean}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{mean}}{273.3 + T_{mean}}\right)$$

式中,  $\Delta$  为气压曲线斜率, KPa/°C;  $T_{mean}$  为平均温度, °C (实测值)。

$$(2) \gamma = 6.6474 + 10^{-4}P$$

式中,  $\gamma$  为气象学常数, KPa/°C;  $P$  为大气压, kPa, 实测值或者用海拔来估算, 估算方法如下:

$$(3) P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26}$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\min}) + e^0(T_{\max})}{2}$$

$$e^0(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{273.3 + T_{\min}}\right)$$

$$e^0(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{273.3 + T_{\max}}\right)$$

式中,  $e_s$  为平均饱和水汽压, KPa;  $T_{\min}$  为最低温度, °C (实测值);  $T_{\max}$  为最高温度, °C (实测值)。

$$(4) e_a = \frac{e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$$

式中,  $e_a$  为实际水汽压, KPa;  $RH_{\max}$  为最大相对湿度, %;  $RH_{\min}$  为最小相对湿度, %。

如果没有最高最低相对湿度资料, 可以用平均相对湿度资料计算:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[ \frac{e^0(T_{\min}) + e^0(T_{\max})}{2} \right]$$

如果没有任何相对湿度资料, 可以用最低温度来估算:

$$e_a = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 273.3}\right)$$

估算原理是每日的最低温度近似于露点, 在充分灌溉的农田二者完全相等, 其他地区差异较大, 因此用该公式之前需要对照当地数据验证, 即该公式实际使用时应该为:

$$e_a = 0.611 \exp\left[\frac{17.27(T_{\min} + dT)}{(T_{\min} + dT) + 273.3}\right]$$

其中,  $dT$  需要事先根据使用地点的实测资料反推得到, 反推公式中的  $e_a$  是根据实测湿度资料计算得出。

$$(5) dT = T_{\min} - \frac{273.3[\ln(e_a) + 0.493]}{17.27 - [\ln(e_a) + 0.493]}$$

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

式中,  $G$  为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $c_s$  为土壤热容量, MJ/(°C·m<sup>3</sup>);  $T_i$  为计算时段末温度, °C;  $T_{i-1}$  为计算时段初温度, °C;  $\Delta t$  为计算时段长, d;  $\Delta z$  为受影响土壤深度, m。

当计算时段  $\Delta t$  超过 1 d 时, 辐射的影响深度  $\Delta z$  决定于时段长度, 几天内  $\Delta z$  只有 0.1~0.2 m, 几个月时  $\Delta z$  或许可以达到 2.0 m。当  $\Delta t$  为 1~10 d 时,  $G$  相对很小, 可以忽略。

$$(6) R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

式中,  $R_n$  为净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $R_{ns}$  为净短波辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $R_{nl}$  为净长波辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。其中,

$$R_{ns} = (1 - a)R_s$$

式中,  $a$  为参考作物冠层反射率, 0.23;  $R_s$  为短波辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

$$\text{其中, } R_s = \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N}\right) R_a$$

式中,  $n$  为实际日照时长, h;  $N$  为最大可能日照时长, h;  $R_a$  为外空净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

如果没有实际日照时长资料, 可以用温度来估算:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a$$

式中,  $k_{Rs}$  为大水体对温度影响的修正系数, 在内陆地区 (气温不受大水体影响) 取 0.16, 沿海地区取 0.19, 不适用于海岛, 且计算的  $R_s$  不得大于  $R_{so}$ , 适用时段应为几天或更长。

逐日计算时, 需要事先根据使用地点的实测资料反推  $k_{Rs}$ :

$$k_{Rs} = \frac{R_s}{\sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a}$$

式中,  $R_s$  为实测值或者有实际日照时长资料的计算值。

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

式中,  $\omega_s$  为日落时刻的角度, rad。

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$

式中,  $\varphi$  为纬度 (北半球为正, 南半球为负), rad;  $\delta$  为日光偏差, rad。

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right)$$

式中,  $J$  为日序数, 1~366。

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

式中,  $G_{sc}$  为日照常数, 0.082 0 MJ/(m<sup>2</sup>·d);  $d_r$  为地球公转影响。

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max,K}^4 - T_{\min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$$

式中,  $\sigma$  为常数, 4.903 × 10<sup>-9</sup> MJ/(K<sup>4</sup>·m<sup>2</sup>·d);  $R_{so}$  为  $R_s$  理论极大值, MJ/(m<sup>2</sup>·d)。

$$R_{so} = (0.25 + 0.5) R_a$$

$T_{\max,K}$  为最高绝对温度,  $T_{\max,K} = 273.15 + T_{\max}$ , K;  $T_{\min,K}$  为最低绝对温度,  $T_{\min,K} = 273.15 + T_{\min}$ , K。

(7) 气象站风速测量高度通常为 10 m, 农业气象学测量高度为 2~3 m; 蒸发计算时需要标准高度 2 m 的风速。不同高度的风速需要换算, 利用下式进行换算:

$$u_2 = u_h \frac{4.87}{\ln(67.8h - 5.42)}$$

基于以上步骤, 可得到潜在蒸散发逐日数据集。

**1.3 作物系数和作物生长周期** 我国幅员辽阔, 作物在不同地区种植收获期不同, 东北某些地区稻谷一年一季, 而南方某些地区甚至达到一年三季。笔者对全国范围内不同地区粮食作物一年一熟、一年两熟和一年三熟等种植特性以及种植季节进行调查, 查阅 FAO 推荐的作物系数, 考虑到不同地区气候条件不同导致的作物系数也不同, 取与我国地区处于同一纬度地区的作物需水系数<sup>[3]</sup>(表 1)。计算某个区域的农业需水量时, 应充分考虑当地的气候条件并进行充分的实地调研。

对于逐日作物需水系数确定, 笔者采用 FAO 网站的线性插值方法, 根据表 1 所示的不同种类作物的 4 个生长阶

段,将初始阶段、中期阶段和最后阶段的  $K_c$  值进行插值,线性插值原理如图 1 所示。由此,可得到我国年内不同种类主

表 1 主要农作物作物系数和生长周期

Table 1 Crop coefficient and growth cycle of major crops

作物种类 Crop type	$K_c$				$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	生育期 Growth period//d	种植时间 Planting time
	初始阶段 Initial stage	中期阶段 Mid stage	最后阶段 Final stage							
冬小麦 Winter wheat	0.40	1.15	0.25	30	140	40	30	240	10月	
春小麦 Spring wheat	0.40	1.15	0.25	20	25	60	30	135	4月	
稻子(两熟) Rice (double cropping)	1.05	1.20	0.90	30	30	60	30	150	12月、5月	
稻子(冬小麦后) Rice (after winter wheat)	1.05	1.20	0.90	25	25	50	25	125	6月	
玉米 Maize	0.30	1.20	0.60	20	35	40	30	125	6月	
谷类 Cereal	0.30	1.15	0.40	20	25	60	30	135	4月	
棉花 Cotton	0.35	1.20	0.70	30	50	55	45	180	4月	
豆类 Bean	0.40	1.15	0.50	20	35	60	25	140	5月	
高粱 Sorghum	0.30	1.15	0.40	20	35	40	30	130	6月	
土豆 Potato	0.50	1.15	0.75	25	30	45	30	130	5月	
油菜 Rape	0.35	1.15	0.35	30	100	40	30	200	11月	
烟草 Tobacco	0.40	1.30	0.40	20	30	30	30	110	3月	
甘蔗 Sugarcane	0.40	1.25	0.75	30	50	180	60	320	2月	
甜菜 Beet	0.35	1.20	0.70	25	35	50	50	160	5月	
其他蔬菜 Other vegetable	0.70	1.10	0.90					365		

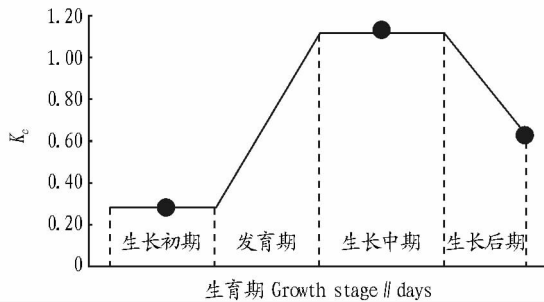


图 1 作物系数插值示意

Fig. 1 Schematic diagram of interpolation of crop coefficient

## 2 计算实例

采用该估算对我国各个县区农业需水量  $Ag_{j,t}$  进行估算,各个县区行主要农作物播种面积以及可耕地面积等指标数据从美国地球观测系统(EOS EARTH)数据图书馆获取。然后将搜集到的农作物播种面积及可耕地面积与我国 2004 版 2 410 个县区单元进行空间匹配,由于 2 套数据集数据来源不同,行政区划在 10 年间有所变动,研究过程中查找实际地图成功匹配了 2 243 个县级行政区,其余 167 个县区单元由于没有适当的匹配数据赋值为空,用图中的空白区域表示。

我国各个县区净播种面积占对应的县区总面积的比例见图 2。从图 2 可见,我国农业种植面积主要集中在华北平原、东北平原和长江中下游平原,这些地区种植面积比例高于 50%,甚至部分地区超过 75%,三大平原能够支持如此高的农业种植比分别受益于黄河-淮河-海河、松花江-嫩江-辽河和长江。此外,我国南方及新疆境内也有零星分布的较高种植面积比例的县区。

采用中国气象数据共享网公布的全国 730 个气象站的 1965~2010 年的气象资料,利用彭曼公式计算逐日潜在蒸发量,而后利用 Thiessen 多边形将站点的潜在蒸发量统计到每个县区。

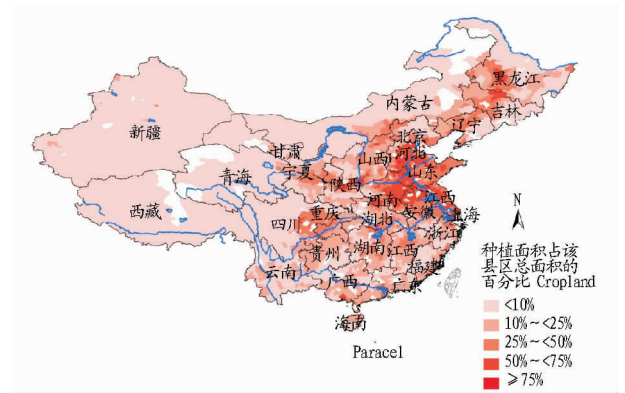


图 2 各县区作物种植面积占总面积比值

Fig. 2 Percentage of crop planting area of each county or district in total area

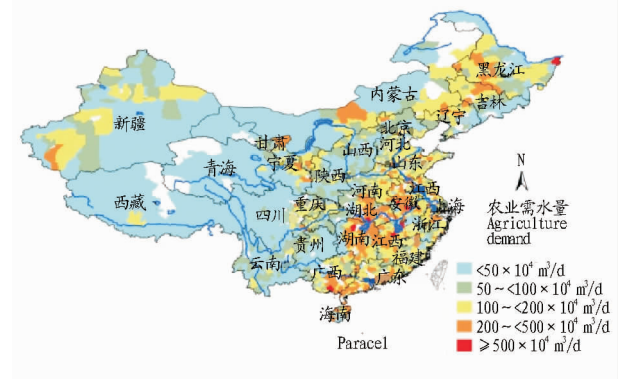


图 3 我国日均农业需水量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of agricultural daily water demand in China

通过以上流程计算得到逐日农业需水量数据集,由于各个县区每日的潜在蒸发量有变化,并且逐日的作物需水系数也在变化,因此农业需水量逐日数据不是常量数据。从图 3 可见,我国东北平原、华北平原、长江中下游平原是农业需水量最高的集中区,大部分地区的日均农业用水量为 100 万

~500 万 m<sup>3</sup>, 部分地区甚至超过了 500 万 m<sup>3</sup>。另外, 华南地区由于水稻种植面积较大, 水稻生育周期中的插秧漫灌等都会导致水稻的耗水量远远高于正常所需, 以至于水稻生育周期内的实际作物需水系数是 FAO 推荐值的 3 倍。因此, 华南地区农业需水量相比华北和西部等地区整体偏高, 华南大部分地区日均农业需水量为 200 万 ~ 500 万 m<sup>3</sup>, 相当一部分县区日均农业需水量高于 500 万 m<sup>3</sup>。新疆县区面积大, 部分地区(如阿克苏河、叶尔羌河流域等)受益于冰川融雪等原因的径流丰沛并灌溉出了一部分绿洲, 大面积种植了农作物, 其日均农业需水量也能达到 100 万 m<sup>3</sup>。

### 3 展望

目前, 很多学者对降水量转化成有利于农作物吸收利用的土壤水和地下水开展了研究, 探寻不同水文气象条件下降

水入渗并储存于农作物根系吸水层内的有效降水量及其变化规律, 从而减少农业灌溉用水量。笔者从作物需水量的角度介绍逐日农业需水量的计算方法, 将作物需水量精确到日, 可以与有效降水量的研究相辅相成, 更好地服务于农业灌溉制度的制订, 减少农业灌溉用水量。

### 参考文献

- [1] DOORENBOS J, PRUITT W. Guidelines for predicting crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977: 156.
- [2] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [3] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 6541.
- [4] 秦年秀, 陈喜, 薛显武, 等. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 357-363.

(上接第 35 页)

**2.5 烟叶化学成分** 由表 5 可知, 不同处理烟叶的化学成分不同, 其中湿润育苗处理各部位烟叶的总糖、还原糖含量稍高, 烟碱含量稍低, 糖碱比更协调, 钾含量稍高, 淀粉含量

稍低。而漂浮育苗和营养袋育苗处理的总糖、还原糖含量稍低, 烟碱含量稍高, 糖碱比较低。可见, 湿润育苗处理烟叶的化学成分更协调。

表 5 不同处理烟叶化学成分

Table 5 Chemical composition of tobacco leaves in different treatments

处理 Treatment	部位 Parts	总糖 Total sugar %	还原糖 Reducing sugar %	烟碱 Nicotine %	总氮 Total nitrogen %	淀粉 Starch %	钾 Potassium %	蛋白质 Protein %	糖碱比 Sugae and alkali ratio	氮碱比 Nitrogen and alkali ratio
①	B2F	17.85	15.34	3.23	1.77	4.25	2.35	7.62	5.52	0.55
	C3F	23.47	20.25	2.65	1.70	4.53	2.46	7.74	8.85	0.64
②	B2F	18.71	15.65	3.15	1.65	4.06	2.39	7.56	5.94	0.52
	C3F	25.85	21.78	2.46	1.62	4.48	2.48	7.69	10.51	0.66
③	B2F	17.99	14.38	3.17	1.67	4.18	2.34	7.59	5.67	0.53
	C3F	24.53	20.47	2.53	1.66	4.50	2.45	7.73	9.69	0.65

### 3 结论与讨论

该试验结果表明, 湿润育苗处理各项生理指标高于或显著高于营养袋育苗和漂浮育苗处理, 与冯宗荣等研究结果<sup>[5-9]</sup>相似, 这可能是漂浮育苗处理的烟苗长期浸泡在水中, 氧气不足, 导致根系不发达, 而湿润育苗处理后期采取浇灌的方式, 保证了根系的通气环境和温度条件, 故根系更发达。不同育苗方式还苗时间不同, 这与各种烟苗素质及土壤环境有关, 湿润育苗所育烟苗根系更为发达, 根系活力和抗性更高, 所以其还苗时间短; 漂浮育苗处理根系长期浸泡在水中, 根系不发达, 根系活力较低, 移栽后不容易适应土壤环境, 所以其还苗时间长, 营养袋育苗处理介于两者之间。同时, 营养袋育苗棚较小, 易受低温影响, 促进其花芽较早分化, 而湿润育苗和漂浮育苗处理采用大棚育苗, 气温条件较好, 较难受低温影响, 故不同烟苗现蕾时间不同。

不同育苗方式烟苗的产质量表现不同。营养袋育苗因为花芽分化较早, 影响烟株的叶片数, 导致产质量较低; 漂浮育苗处理因为生育期较迟, 导致团棵至采烤期较短, 影响了光合产物的物质积累, 从而影响烟叶的产质量。烤烟是一种

育苗移栽作物, 烟苗素质直接影响到烤烟移栽后的生长状况、抗逆性、产量和质量。从试验结果来看, 湿润育苗处理烟苗根系发达, 移栽大田生长快, 田间整齐度好, 株高、叶长、宽均有增加, 且抗逆能力强, 有利于提高烟叶质量, 是一项适合粤北烟区的先进育苗方式。

### 参考文献

- [1] 刘建利. 我国烤烟育苗新技术及发展方向[J]. 中国烟草科学, 2000, 21(2): 45-46.
- [2] 王树声, 董建新, 刘新民, 等. 烟草集约化育苗技术发展概况[J]. 烟草科技, 2003(5): 43-45.
- [3] 郑传刚. 不同育苗方式烟苗生理指标与烟苗素质的相关性[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 70-72.
- [4] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [5] 冯宗荣, 郭群召, 牛寻, 等. 不同烟苗移栽对烟株生理特性及烟叶产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2015, 27(8): 88-91.
- [6] 王德勋. 不同育苗方式对烤烟烟苗素质及生长发育的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011: 1-54.
- [7] 韦成才, 吴斌, 王有春, 等. 不同育苗方法对烟苗素质及产质量的影响[J]. 陕西农业科学, 1994(2): 18-19.
- [8] 胡龙兴, 颜合洪, 刘宁芳. 育苗方式对烟苗生长发育及生理特性的影响[J]. 烟草科技, 2006(1): 46-49.
- [9] 龚明. 作物抗旱性鉴定方法与指标及其综合评价[J]. 云南农业大学学报, 1989(1): 73-81.