

# 探索涝渍连续抑制天数指标作为水稻排水标准的试验

俞双恩<sup>1,2</sup>, 郭杰<sup>1,2</sup>, 陈军<sup>3</sup>, 丁继辉<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 宿迁市宿城区水务局, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 为探索涝渍连续抑制天数指标作为水稻排水标准, 通过测坑模拟水稻抽穗开花期涝渍连续动态试验, 构建了水稻涝渍连续抑制天数指标(Continuous Stress-Day Index of Water Logging, CSDI)的模型, 提出了CSDI和涝害权重系数的求解方法, 通过对实测数据的分析, 建立了水稻相对产量与CSDI的关系模型。研究表明: 单纯受渍和涝渍连续灾害均会造成水稻不同程度的减产, 但涝渍连续灾害减产程度比单纯受渍高; 涝害权重系数是一个随涝渍状态变化而变化的状态变量; 在涝渍连续情况下, 水稻的相对产量与CSDI具有良好的线性关系, 涝渍连续抑制天数指标可作为水稻排水设计标准。利用文中CSDI的模型, 可制定水稻控制排水策略。

**关键词:** 水稻; 抽穗开花期; 涝渍连续抑制天数指标; 排水标准

**中图分类号:** S276      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)02-0282-06

水稻生长期与汛期同季, 由于降雨次数多, 强度大, 涝渍灾害相伴相随。在暴雨和连续降雨条件下, 当稻田水深超过水稻的允许蓄水深度而不能及时排除时, 就会形成涝灾; 有时稻田水层虽然在适宜淹水层, 但受排水沟高水位顶托, 稻田渗漏量极小, 在嫌气微生物的作用下, 有毒物质(如甲烷、硫化氢等)就会在水稻根系积累而形成渍害<sup>[1]</sup>。因此, 在水稻生长期应注意涝渍灾害对水稻生长产生的不利影响。

国内外主要以作物的允许耐淹深度与耐淹历时作为排涝设计标准确定的依据, 相应的排涝标准规定为涝区发生某一频率的暴雨, 在一定的时间内排除则作物不受涝; 在降渍方面, 通常采用地下水适宜埋深和地下水降落速度作为旱作物和水稻晒田期的排渍标准。近40年来, 国内外学者考虑到作物在不同生长阶段对渍害的敏感程度的差异, 开始研究并采用地下水连续动态指标 $SEW_x$ (Sum of Excess soil Water)、累积减产指标CRI(Cumulative yield Reduction Index)等作为农田排渍标准<sup>[2-3]</sup>, Hiler于1969年提出将抑制天数SDI(Stress Day Index)作为作物受渍指标<sup>[4]</sup>。长期的生产实践表明, 在涝渍相随情况下, 作物对排水的要求与单纯受涝及单纯受渍差异很大, 片面强调一方而忽视另一方均不能达到良好的排水效果, 因此研究涝渍兼治的农田排水标准近年来备受关注<sup>[5-7]</sup>。Rojas和Willardson<sup>[8]</sup>将总排水时间(即地面排水时间+土壤通气率达到10%的时间)作为涝渍排水设计指标; 沈荣开等<sup>[2]</sup>采用地面水累积深度(Sum of excess Flooding Water depth, SFW)和地下水埋深小于某一特定深度 $x$ 的累积值 $SEW_x$ 作为涝渍指标特征值; 程伦国等<sup>[9]</sup>采用涝渍因子SFW、 $SEW_{50}$ 、 $SFEW_{50}$ (Sum of Flooding water depth and Excess soil Water)描述棉花受涝渍胁迫的程度; 汤广民<sup>[10]</sup>通过对涝渍连续动态的模拟试验研究, 提出了涝渍连续抑制天数指标(Continuous Stress-Day Index of water logging, CSDI)。CSDI能够将除涝和降渍两者有机结合, 符合农田排水的客观实际, 克服了涝渍分割研究的不足。国内外有关涝渍兼治标准的研究主要是针对旱作物进行的, 针对水稻的研究较少。本文以水稻抽穗开花期涝渍试验为基础, 借鉴旱作物CSDI的分析方法<sup>[10-11]</sup>, 提出以涝渍连续抑制天数指标为水稻涝渍兼治排水标准, 为指导水稻控制排水技术的应用提供理论依据。

收稿日期: 2013-05-29; 网络出版时间: 2014-02-26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140226.1355.015.html>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2011037); 河海大学中央高校基本科研业务费资助项目(2011B12214)

作者简介: 俞双恩(1961—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 主要从事现代灌排理论与技术研究。

E-mail: sey@hhu.edu.cn

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验于2010年5~10月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室江宁校区的试验场内进行。试验区属亚热带湿润性气候, 多年平均降雨量为1 021.3 mm, 多年平均降雨天数约120 d, 其中, 汛期(5~9月)雨量占年均雨量的60%以上。该区多年平均水面蒸发量为900 mm左右, 多年平均气温为15.7℃, 最高月平均温度为28.1℃, 最低月平均温度为-2.1℃, 最大平均湿度为81%, 年无霜期为237 d, 年均日照时数为2 212.8 h。

试验区设有32个固定式蒸渗测坑(其中无底4个, 有底28个), 呈南北方向两排布置, 每个测坑的规格为2.5 m×2.0 m×2.0 m(长×宽×深), 试验区有自动供排水系统, 能实现每个测坑精确供排水。

### 1.2 试验材料

供试水稻品种为扬粳4038, 栽插密度为22 cm×15 cm, 每穴3株。蒸渗测坑内土壤为粘壤土, 由当地土分层回填密实而成, 已经过5年的稻麦轮作。

### 1.3 试验处理

水稻不同生育阶段对涝渍灾害的响应是不同的, 限于试验条件, 仅对水稻抽穗开花期(排水敏感期)进行涝渍连续动态试验, 其他生育阶段均按水稻节水灌溉制度进行田间水分管理。基本假设: 水稻在适宜水层深度时保持田间渗漏量大于4 mm/d时, 则认为水稻无渍害存在。在有底蒸渗测坑内设置了单纯受渍试验、涝渍兼有2组试验共7个处理, 在无底测坑内设置对照处理, 每个处理4次重复。处理1为单纯受渍试验, 抽穗开花期保持田面适宜水层30 mm, 无田间渗漏, 保持受渍10 d; 处理2~处理7都是涝渍兼有试验, 抽穗开花期保持田面适宜水层分别为250 mm和150 mm, 两组试验都有3组田间渗漏量, 分别为0 mm/d、2.5 mm/d和1.5 mm/d, 保持受涝渍10 d, 如表1所示。

涝渍试验结束后, 及时将田面水层深度降至水稻适宜水层上限, 田面有水层时保持4 mm/d的渗漏量, 田面无水层时保持无渗漏量。

以水稻全生育期不涝不渍作为对照(CK)。

### 1.4 观测内容

指标观测: 试验期每天上午9:00观测测坑水位(水层深及田间地下水埋深), 低于设定的水位应及时补水, 并按试验要求观测灌水量、排水量。

考种工作: 按照《SL13—2004 灌溉试验规范》要求, 在收割前4 d左右, 各测坑随机选取5穴, 测量其株高、穗长、穗数、节间距、实瘪粒数, 计算结实率。收割时, 每个测坑单打单收, 计算千粒重并实测产量。

### 1.5 分析方法

涝渍连续抑制天数指标CSDI是指涝渍相随条件下的地面水和地下水的连续动态。可反映作物不同生长阶段对受涝渍敏感程度的差异。可选用的模型如下:

表1 水稻抽穗开花期涝渍试验方案

Table 1 Experiments of water logging and excessive soil water of rice at heading and flowering stage

处理 编号	各生育期调控水位/mm			
	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
1			30(0 mm/d)	
2			250(2.5 mm/d)	
3			250(1.5 mm/d)	
4	-200~-20	-300~30	250(0 mm/d)	-300~30
5			150(2.5 mm/d)	
6			150(1.5 mm/d)	
7			150(0 mm/d)	
CK			-300~30	

$$I_{\text{CSD}} = \sum_{i=1}^n (h_{xi} + C_{wi}d_{yi}) \quad (1)$$

式中  $I_{\text{CSD}}$  为涝渍连续抑制天数指标,  $\text{cm}\cdot\text{d}$ ;  $n$  为作物的生育阶段数;  $C_{wi}$  为第  $i$  阶段的作物涝害权重系数, 通过试验数据分析确定;  $d_{yi}$  为第  $i$  阶段在统计期稻田水层深度超过适宜水深上限  $y_i$  的累积值,  $\text{cm}\cdot\text{d}$ ,  $d_{yi} = \sum_{j=1}^m (h_j - y_i)$ ,  $h_j$  为  $i$  阶段第  $j$  天稻田水层深度,  $\text{cm}$ ,  $m$  为  $i$  阶段统计期的天数, 当  $h_j - y_i \leq 0$  时, 取  $h_j - y_i = 0$ 。 $h_{xi}$  为第  $i$  阶段在统计期内第  $j$  天排水沟作用水头  $H_j$  小于该阶段适宜渗透量时的排水沟作用水头  $x_i$  的累积值,  $\text{cm}\cdot\text{d}$ ,  $h_{xi} = \sum_j (x_i - H_j)$ , 当  $x_i - H_j \leq 0$  时, 取  $x_i - H_j = 0$ 。排水沟的作用水头  $H$  由下式计算<sup>[12]</sup>:

$$H = \frac{Bq\Phi_0}{k} \approx \frac{Bq(0.5 + 0.174H_q/T)}{k} \quad (2)$$

$$H = H_q + h_0 \quad (3)$$

式中  $B$  为末级固定排水沟间距,  $\text{m}$ ;  $k$  为排水地段含水层平均渗透系数,  $\text{m}/\text{d}$ ;  $q$  为稻田渗漏强度,  $\text{mm}/\text{d}$ ;  $\Phi_0$  为稳定渗流情况下排水沟排水地段的渗流阻抗系数;  $H_q$  为对应于  $q$  的排水沟有效深度,  $\text{m}$ , 一般指田面与沟中水位差值;  $T$  为排水地段含水层的平均厚度,  $\text{m}$ ;  $H$  为排水沟的作用水头,  $\text{m}$ , 一般指田面水位与沟中水位差值;  $h_0$  为稻田水层深度,  $\text{m}$ 。对于特定的稻作区, 农沟间距和水文地质参数均已知, 根据不同的  $q$  即可利用式(2)计算出相应的排水沟作用水头  $H$ 。

农田排水标准主要是根据作物的排水敏感期对排水要求制定的, 本试验主要研究水稻的抽穗开花期。即式(1)可简化为

$$I_{\text{CSD}} = h_x + C_w d_y \quad (4)$$

作物的相对产量  $R_y$  与  $h_x$ 、 $d_y$  之间可建立统计关系  $R_y = F(h_x, d_y)$ 。

在单纯受渍情况下

$$R_y = 1 - \alpha h_x \quad (5)$$

在涝渍连续情况下

$$R_y = 1 - \alpha h_x - \alpha_1 d_y - \alpha_2 h_x d_y \quad (6)$$

对应于某一  $d_x$ : 由式(6)得

$$R_{yk} = A_k - \alpha_k h \quad (7)$$

作物的相对产量  $R_y$  与  $I_{\text{CSD}}$  之间可建立统计关系

$$R_y = 1 - \alpha I_{\text{CSD}} \quad (8)$$

在涝渍连续情况下, 将式(4)代入式(8)中, 则

$$R_y = 1 - \alpha(h + C_w d) \quad (9)$$

令式(7)=式(9), 得

$$C_w = \frac{1 - A_k}{\alpha d} + \frac{\alpha_k - \alpha}{\alpha d} h \quad (10)$$

$$I_{\text{CSD}} = \frac{1 - A_k}{\alpha} + \frac{\alpha_k}{\alpha} h \quad (11)$$

## 2 试验结果及分析

### 2.1 涝渍连续抑制天数指标 $I_{\text{CSD}}$ 与相对产量 $R_y$ 的关系

以涝渍连续抑制天数  $I_{\text{CSD}}$  为控制指标, 建立  $I_{\text{CSD}}$  与水稻相对产量  $R_y$  的关系。2010 年水稻产量如表 2 所示。由于抽穗开花期为水稻主要的排水敏感期, 所以本文着重对该阶段进行研究。从表 2 可以看出, 单纯受渍和涝渍连续灾害均会造成水稻不同程度的减产, 且涝渍连续灾害减产程度比单纯受渍高。

表 2 2010 年各处理水稻产量  
Table 2 Treatments of rice yield in 2010

处理	1	2	3	4	5	6	7	CK
理论产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	8 366.7	8 050.7	7 007.3	6 897.4	8 290.3	7 865.2	7 509.2	8 988.5
减产程度/ %	6.9	10.4	22.0	23.3	7.8	12.5	16.5	

## 2.2 实例分析

河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室江宁校区的试验场内稻作区, 已知农沟间距  $B=100\text{ m}$ , 稻田土壤平均渗透系数  $k=0.3\text{ m/d}$ , 排水地段含水层平均厚度  $T=10\text{ m}$ , 稻田适宜渗漏量取  $4\text{ mm/d}$ , 田面水深取适宜水深的上限为  $30\text{ mm}$ , 通过式(2)和式(3)计算,  $x$  取值为  $67.5\text{ cm}$ 。各处理的排水沟作用水头及  $h$  见表 3。

表 3 各处理的排水沟作用水头及  $h$   
Table 3 Treatments of drain waterhead and  $h$

处理	1	2	3	4	5	6	7
排水沟作用水头/cm	0	41.9	25.0	0	42.1	25.1	0
$h/(\text{cm}\cdot\text{d})$	675	256	425	675	254	424	675

单纯受渍试验: 
$$R_y = 1 - 1.02 \times 10^{-4}h \quad (12)$$

涝渍连续试验: 点绘出水稻的相对产量  $R_y$  与  $h$  的关系曲线, 可得如下关系模型:

$$R_y = 0.9438 - 2.9 \times 10^{-4}h, r = -0.8534 \quad (13)$$

点绘出水稻的相对产量  $R_y$  与  $h$  的关系曲线, 可得如下关系模型:

$$R_y = 0.9690 - 2.0 \times 10^{-4}h, r = -0.9869 \quad (14)$$

根据式(10)和式(11), 可分别求得不同  $d$  对应的涝害权重系数  $C_w$  及涝渍连续抑制天数指标  $I_{\text{CSD}}$ 。

当  $d=220\text{ cm}\cdot\text{d}$  时

$$C_w = 2.50 + 8.38 \times 10^{-3}h \quad (15)$$

$$I_{\text{CSD}} = 550.98 + 2.84h \quad (16)$$

当  $d=120\text{ cm}\cdot\text{d}$  时

$$C_w = 2.53 + 8.01 \times 10^{-3}h \quad (17)$$

$$I_{\text{CSD}} = 303.92 + 1.96h \quad (18)$$

将式(16)代入式(13)或将式(18)代入式(14)得

$$R_y = 1 - 1.02 \times 10^{-4}I_{\text{CSD}} \quad (19)$$

式(19)为水稻抽穗开花期在涝渍连续条件下的排水指标计算模型。

在不同涝渍抑制条件下,  $C_w$  和  $I_{\text{CSD}}$  与  $h$  的关系曲线如图 1、图 2 所示。

从图 1、图 2 可以看出,  $I_{\text{CSD}}$  和  $C_w$  是随涝渍状态变化而变化的状态变量。  $C_w$ 、 $I_{\text{CSD}}$  与  $h$  呈线性关系, 在  $d$  一定的条件下,  $C_w$ 、 $I_{\text{CSD}}$  随着  $h$  的增大而增大; 在  $h$  一定的情况下,  $C_w$ 、 $I_{\text{CSD}}$  随着  $d$  的增大而增大。

利用排水指标计算模型, 通过规定不同的产量水平, 即可求得相应的涝渍连续抑制天数指标  $I_{\text{CSD}}$ , 进而可求得各种涝渍组合条件下的  $d$  和  $h$  值, 为制定排水标准提供理论参考依据。

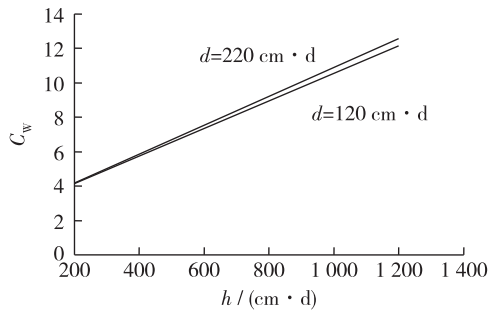


图 1 水稻抽穗开花期不同地面水累积深度  $d$  条件下的  $C_w$  与  $h$  的关系

Fig. 1 Relationship of  $h$  and  $C_w$  under the condition of different  $d$  at heading and flowering stage of rice

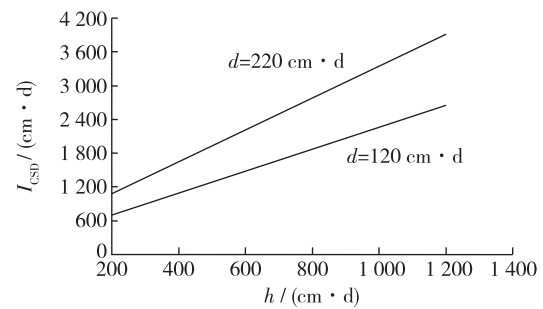


图 2 水稻抽穗开花期不同地面水累积深度  $d$  条件下的  $I_{CSD}$  与  $h$  的关系

Fig. 2 Relationship of  $h$  and  $I_{CSD}$  under the condition of different  $d$  at heading and flowering stage of rice

### 3 结 论

(1) 单纯受渍和涝渍连续灾害均会造成水稻不同程度的减产，且涝渍连续灾害减产程度比单纯受渍高。

(2) 在分析试验资料的基础上，采用涝渍连续抑制天数指标，建立其与水稻相对产量  $R_y$  的关系模型。研究表明， $I_{CSD}$  和  $C_w$  是随涝渍状态变化而变化的状态变量， $C_w$ 、 $I_{CSD}$  与  $h$  呈线性关系，涝与渍之间具有相互制约和依存的内在联系。

(3) 水稻相对产量  $R_y$  与涝渍连续抑制天数指标具有良好的线性关系，利用该模型，通过规定不同的产量水平，即可求得相应的涝渍连续抑制天数指标，进而可求得各种涝渍组合条件下的  $d$  和  $h$  值，为制定水稻控制排水策略提供理论依据。

#### 参考文献：

- [1] 郭元裕. 农田水利学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 189-191. (GUO Yuanyu. Irrigation and drainage engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China WaterPower Press, 1997: 189-191. (in Chinese))
- [2] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳, 等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报, 1999(3): 71-74. (SHEN Rongkai, WANG Xiugui, ZHANG Yufang, et al. A study on the drainage index for combined control of surface and subsurface waterlogging[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(3): 71-74. (in Chinese))
- [3] 张蔚榛, 张瑜芳, 沈荣开. 小麦受渍抑制天数指标的探讨[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(5): 1-5. (ZHANG Weizhen, ZHANG Yufang, SHEN Rongkai. Study of stress day index of winter wheat [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1997, 30(5): 1-5. (in Chinese))
- [4] 温季, 王少丽, 王修贵. 农业涝渍灾害防御技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 1-50. (WEN Ji, WANG Shaoli, WANG Xiugui. Waterlogging disaster prevention technology in agriculture[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000: 1-50. (in Chinese))
- [5] 程伦国, 朱建强, 刘德福, 等. 田间涝渍对棉花产量的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 42-45. (CHENG Lunguo, ZHU Jianqiang, LIU Defu, et al. Influence of waterlogging on cotton output in cropland[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 42-45. (in Chinese))
- [6] 王矿, 潘强, 汤广民, 等. 灌浆期小麦排水指标的试验研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 59-62. (WANG Kuang, PANG Qiang, TANG Guangmin, et al. Experimental study on drainage index during wheat filling period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 59-62. (in Chinese))
- [7] 李慧伶, 王修贵, 程伦国, 等. 多阶段受涝渍综合影响的农田排水指标试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 1-4. (LI Huiling, WANG Xiugui, CHENG Lunguo, et al. Research on the criteria of farm land drainage under the influence of combined controlling of surface and subsurface water logging in several phases of cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 1-

4. (in Chinese))
- [8] ROJAS R M, WILLARDSON L S. Estimation of the allowable flooding time for surface drainage design[J]. Twelfth Congress on Irrigation and Drainage, Transaction, 1984,1(B):493-505.
- [9] 程伦国, 王修贵, 朱建强, 等. 多过程连续涝渍胁迫对棉花产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2006(8): 59-61. (CHENG Lunguo, WANG Xiugui, ZHU Jianqiang, et al. Influences of multi-stage successive water logging on cotton yield[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(8): 59-61. (in Chinese))
- [10] 汤广民. 以涝渍连续抑制天数为指标的排水标准试验研究[J]. 水利学报, 1999(4): 25-29. (TANG Guangmin. Experimental study on drainage standard[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(4): 25-29. (in Chinese))
- [11] 邵光成, 俞双恩, 刘娜, 等. 以涝渍连续抑制天数为冬小麦排水指标的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 56-60. (SHAO Guangcheng, YU Shuang'en, LIU Na, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 56-60. (in Chinese))
- [12] GB 50288—99. 灌溉与排水工程设计规范[S]. (GB 50288—99. Cod for design of irrigation and drainage engineering[S]. (in Chinese))

## Experimental study of continuous stress-day index of water logging and excessive soil water as drainage standard of rice paddy fields\*

YU Shuang'en<sup>1,2</sup>, GUO Jie<sup>1,2</sup>, CHEN Jun<sup>3</sup>, DING Jihui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of High-Efficient Irrigation and Drainage and Agriculture Water and Soil Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Sucheng Water Conservancy Bureau of Suqian City, Suqian 223800, China)

**Abstract:** To explore the possibility of using the Continuous Stress-Day Index (CSDI) of waterlogging and excessive soil water as a drainage standard for rice paddy fields, consecutive and dynamic experiments on waterlogging and excessive soil water are conducted in testing pits during the heading and flowering stage of paddies. An CSDI model is developed to deal with waterlogging and excessive soil water issues. The model solution and the weight coefficient of waterlogging ( $C_w$ ) are provided. The relationship of rice yield and CSDI is established through the analysis of experimental data. Results show that the stress and continuous stress from surface and subsurface waterlogging can reduce the rice yield in various degrees. The degree of yield-reduction is relatively high due to the continuous stress from surface and subsurface waterlogging. The weight coefficient  $C_w$  is a state variable that varies with the status of surface and subsurface waterlogging. A linear relationship between relative rice yield and CSDI can be observed under the condition of continuous stress from surface and subsurface waterlogging. Thus, the index CSDI can be utilized as a drainage standard for paddy fields, and the controlled drainage rules could be developed using the CSDI model.

**Key words:** paddy; heading and flowering stage; continuous stress-day index of water logging and excessive soil water; drainage standard

\* The study is financially supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2011B12214).