

浙江水稻氮肥优化的决策支持系统ONIR^①

谢文霞¹, 徐绍辉¹, 王光火^{2*}

(1 青岛大学化学化工与环境学院, 山东青岛 266071; 2 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘要: 在大量田间试验的基础上,建立了浙江水稻氮肥优化决策支持系统ONIR(optimizazation of nitrogen to irrigated rice)。该系统是利用NuDSS (nutrient decision support system) 与独创的NSAM (N splitting application model) 有机结合而成的。氮肥分次施用模型 (NSAM) 是根据水稻生长发育规律和养分平衡供应原理建立的, 目的是确定各生育期的氮肥施用量, 也就是氮肥的分次施用量。系统验证结果表明, 模拟值与实测值均落在直观图 1:1 线附近, 线性回归 t 检验平均 >0.05 , 斜率 α 在 0.847~1.034 之间, 确定系数 R^2 在 0.85~0.99 之间, 均方差误差为 1~110 kg/hm², 规范均方根为 9%~24%。在浙江水稻区, 当目标产量为 7.3 t/hm² (晚稻) 和 8.3 t/hm² (中稻) 时, 利用ONIR推荐的最佳氮肥用量分别为 120 kg/hm² 和 150 kg/hm²; 基肥、分蘖前期、幼穗分化期和抽穗期施肥的分配比例: 晚稻为 0.4:0.2:0.4:0 或 0.4:0.2:0.2:0.2, 中稻为 0.4:0.2:0.4:0 或者 0.4:0.2:0.2:0.2。

关键词: 模型; 氮的优化; 水稻; 验证

中图分类号: S143.1; S511

氮(N)素是限制水稻生长发育及产量形成的重要养分因子之一,目前水稻的高产与N肥的大量施用有密切的关系。但是,如果N肥用量过大,则不仅增产效果有限,而且造成N素流失,导致环境污染^[1-2]。根据近年来的研究结果^[3-4],浙江地区N肥的管理还存在不少问题,N肥的利用效率较低,高N肥投入并没达到预期的高回报。如果能够合理地施用N肥,可以在减少投入的同时保护环境。因此,寻求N肥的施用量与作物对N素需要量之间的平衡,减少N损失和提高作物对N的利用率至关重要。随着信息农业和数字农业快速发展,运用作物模拟技术理论和方法来定量地研究水稻生长发育生理过程中的N肥管理调控是一个不错的选择。

最初的研究认为在田间试验的几个N肥处理中,表现最大产量或最大N肥利用率的处理为最适N肥管理措施^[5]。Ueno等^[6]提出“差值法”,即用作物需N量和土壤供N量之间的差值来决定施N量。Zacharias等^[7]将动态模拟与水稻植株组织养分分析和线性回归分析相结合来优化N肥管理,可以说是最早使用数学模型优化水稻N肥管理的研究。通过改变输入的环境因子,比如养分和水分,来预测作物产量改变的研究

已经很多^[8]。综合性模型,如ORYZA系列,是通过模拟土壤N过程,作物N的吸收和作物N的利用来估计不同施肥策略对水稻生长及产量的影响^[9]。Ten Berge等^[10-11]对ORYZA-0模型进行了修改,形成了N肥管理优化系统MANAGE-N。迄今为止,已有不少学者对该模型进行了检验^[12-13]。NuDSS (nutrient decision support system),即养分决策支持系统,是近年来以QUEFTS模型和实地养分管理(SSNM)技术为基础发展起来的^[14]。NuDSS可以帮助用户估计一定目标产量下的N、P、K的用量,选择最合理的肥料组合等。NuDSS已经在亚洲的一些地区得到了成功的运用。通过NuDSS模拟得到的N肥需求量,是根据当地平均的气候条件和目标产量计算获得的。

本研究以 NuDSS 为基础,建立一个简单并适合浙江水稻生长的 N 肥优化决策系统 ONIR (optimization of nitrogen to irrigated rice)。该优化决策支持系统包括两个子模型,一是 NuDSS,该模型可以确定目标产量下水稻最佳需肥总量;二是 N 肥分次施用模型 NSAM (nitrogen splitting application model),该模型根据水稻生长发育规律和养分平衡供应原理,确定各生育期的 N 肥施用量,也就是 N 肥的分次施用量。该

①基金项目:欧共体国际合作项目(ICA4-CT-2001-10055)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2008BS09010)资助。

*通讯作者(10414012@zju.edu.cn)

作者简介:谢文霞(1978—),女,山东淄博人,博士,讲师,主要从事氮肥管理以及环境污染研究。E-mail: wenglory@sohu.com

1 试验材料

1.1 数据库 I

1.1.1 试验 1 试验于 2001—2002 年在浙江省金华市石门农场（29°7'N，119°39'E）进行。供试水稻品种为籼型三系杂交稻汕优 63。移栽后的行距为 20 cm × 20 cm，每丛 1 粒谷苗，小区面积 30 m²，N 肥 7 个处理（N₁ ~ N₇），4 次重复，随机区组排列。7 个处理分别为：N₁ 为对照，不施 N 肥；N₂ ~ N₄ 分别固定施 N 总量，N 肥的施用期以及在水稻各生育期的分配比例按精细养分管理技术确定，即三叶期、分蘖始期和幼

穗分化始期的施 N 质量比为 20 : 35 : 45；N₅ 为农民常规施肥处理；N₆ 的施肥时期同 N₂ ~ N₄，三叶期的施肥量固定为 20 kg/hm²，分蘖始期和幼穗分化始期的施 N 量分别由施肥 1 天所测定的叶片叶绿素含量，即叶绿素计的 SPAD 读数来确定；N₇ 的 N 肥施用期和施用量均由 SPAD 读数来确定，即从播种后第 21 日开始测定，若读数低于 34 则施 N 肥，在生长旺盛的分蘖盛期至孕穗期施 N 量为 45 kg/hm²，在生长前期和后期，则为 30 kg/hm²，若读数高于 34，则不施 N 肥。P 肥、K 肥、Zn 肥的用量分别为 P 40 kg/hm²、K 100 kg/hm² 和 Zn 5 kg/hm²，均作基肥。试验地土壤的基本性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本性质（试验 1）

Table 1 Basic properties of the tested soils (Experiment 1)

pH	总 N (g/kg)	速效 P (mg/kg)	交换性 K (mg/kg)	阳离子交换量 (cmol/kg)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)
4.50	1.68	28.5	50.7	5.40	280	585	135

1.1.2 试验 2 试验于 2002—2003 年在浙江省金华市石门农场进行，采用裂区设计，主区为肥料处理，设为：对照（不施肥，CK）、施磷钾（PK）、施氮钾（NK）、施氮磷（NP）、施氮磷钾（NPK）；副区为水稻品种，供试水稻品种为：晚稻为协优 46 和秀水 11。插植密度早晚稻均为 20 cm × 20 cm，小区面积为 45 m²。N、P、

K 化肥分别用尿素、过磷酸钙和氯化钾。每季施用量和方法为：N 肥用量为 180 kg/hm²，其中 50% 作基肥，25% 在分蘖前期施用，25% 在幼穗分化期施用；P 肥（P 25 kg/hm²）全部作为基肥；K 肥（K 100 kg/hm²）50% 作基肥，50% 在幼穗分化期施。试验田土壤的基本理化性质见表 2。

表 2 供试土壤的基本性质（试验 2）

Table 2 Basic properties of the soils (Experiment 2)

pH	有机 C (mg/kg)	有效 P (mg/kg)	交换性 K (mg/kg)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)
4.80	16.5	16.5	54.6	278	562	160

1.1.3 试验 3 田间试验于 2004 年在浙江大学华家池校区试验农场（30°14'N，120°10'E）进行，供试品种为两优培九。小区面积 16 m²，4 个处理，3 次重复，完全随机排列。N 素 2 个处理水平，分别施纯 N 0 kg/hm²（N₀）和 180 kg/hm²（N₁），其中基肥 40%，移栽后 5 ~ 7 天以及幼穗分化期取样后分别施 30%；纯 P 23 kg/hm² 的 P 肥和纯 K 100 kg/hm² 的 K 肥，全部作为基肥。行、株距为 20 cm × 20 cm。采取淹水灌溉，中期不晒田，控制病虫害和杂草。

1.1.4 试验 4 试验于 2000 年在浙江省金华市石门农场进行。供试品种为杂交晚稻协优 46，插植密度为 20 cm × 20 cm，3 次重复，小区面积为 134 m²。N、

P、K 化肥分别用尿素、过磷酸钙和氯化钾。P 肥 25 kg/hm²（纯 P）和 K 肥 75 kg/hm²（纯 K）全部作基肥。N 肥分期施用，有 3 个处理：N₁ 为对照，不施 N 肥；N₂ 处理中 50% 做基肥，50% 插后 10 天施用；N₃ 处理中 30% 做基肥，30% 插后 10 天施用，30% 幼穗分化期施，10% 始穗期施用。

所有试验均于移栽期、分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期、成熟期，在每个小区选择生长均匀处平土收割 6 丛水稻，然后按叶片、叶鞘+茎、穗分成几部分，在 70℃ 分别烘干称重，粉碎，供养分含量分析。用凯氏定氮法测定 N 含量。成熟期在取样小区收割 125 丛（5 m²），脱粒，晒干，风选法除去秕粒后称重测产。

1.2 数据库 II

该数据库中的数据来自文献资料。主要试验如下:

1.2.1 严力蛟等^[15] (2003) 1997 在浙江省绍兴市农业学校试验农场进行的连作晚稻试验。N 肥用量设 7 个处理, 总施 N 量分别为 0、98、120、143、165、188、210 kg/hm², 其中 60% 为基肥, 20% 分蘖早期施用, 另外穗肥和粒肥各占 10%。过磷酸钙 375 kg/hm², 氯化钙 150 kg/hm², 做基肥一次施用。密度 17 cm × 13 cm。小区面积 16 m², 4 次重复, 随机排列。

1.2.2 杨京平等^[16] (2002) 1999 年在浙江大学华家池校区试验农场对晚稻进行了试验。N 肥设 5 个处理, 总施 N 量分别为 0、80、120、160、200 kg/hm², 其中 55% 为基肥, 30% 分蘖早期施用, 另外 15% 幼穗分化期施用。密度 20 cm × 7 cm, 小区面积为 32 m², 随机区组设计。土壤体积质量 (容重) 为 1.17 g/cm³, 质地为粉砂壤土。

1.2.3 傅庆林等^[17] (1999) 1999 在浙江东阳进行晚稻试验, N 肥设 7 个处理, 总施 N 量分别为 0、50、100、150、180、225、300 kg/hm², 其中 60% 为基肥, 40% 分蘖早期施用。钙镁磷肥 40 kg/hm² 和氯化钾 60 kg/hm² 作基肥一次施入。密度 12 cm × 17 cm, 小区面积 30 m², 3 次重复, 随机排列。

2 系统 ONIR 的建立与描述

水稻生长的 N 肥优化决策支持系统 ONIR 是在 NuDSS 的基础上, 与 NSAM (N splitting application model) 结合而成的。ONIR 的模拟结果利用数据库 I 中的试验 1、2、4 对模型进行检验。一方面采用观测值与模拟值之间 1:1 图以直观展示模型的预测精度, 另一方面利用斜率 (α)、截距 (β)、相关系数 (R^2)、 t 检验以及均方根误差和规范均方根对系统进行检验。

2.1 NuDSS 的描述

2.1.1 理论基础 NuDSS 用来估计在特定气候条件下, 对于具体水稻品种达到目标产量所需要的 N、P、K 肥料用量。该决策支持系统的核心是 QUEFTS 模型。QUEFTS 模型的计算包括 4 个部分: ①测定土壤潜在 N、P、K 供应能力; ②建立土壤潜在供肥量和作物 N、P 和 K 实际吸收量之间的关系式; ③建立作物 N、P 和 K 实际吸收量和产量范围之间的关系式; ④建立 N、P 和 K 两两对应的产量范围和最终的预估产量之间的关系式。

2.1.2 决策过程 首先根据气候条件和土壤肥力状况, 把研究领域划分为农业生态小区, 在每个生态小区分别设立多个缺肥空白小区, 通过空白小区可以

获得 N 限制产量、P 限制产量和 K 限制产量。其次是确定目标产量, 目标产量一般以大于实际产量的 10%, 小于潜在产量的 75% ~ 80% 为宜。最后计算肥料养分的需要量。

2.2 NSAM 的描述

NSAM 模型是以文献资料的定性分析与田间试验 (数据库 I 中试验 3 以及数据库 II) 的定量研究相结合, 应用系统分析方法与回归分析相结合, 确定水稻产量及 N 素吸收利用特性与品种类型、施肥量之间的内在联系, 建立起相应的数学模型。

2.2.1 含 N 量随时间的变化 通过资料查询和分析实验数据得知, 植株含 N 量的变化趋势一般是先升高后降低, 在不施 N 处理下, 植株吸 N 量随时间变化可以用如下经验模型表示^[18]:

$$NA_j(0) = A_0 + A_1 \times DAT + A_2 \times (DAT)^2 + A_3 \times (DAT)^3 \quad (1)$$

其中, $NA_j(0)$ 代表不施 N 小区水稻植株 N 的积累 (kg/hm²), j 代表 4 个生育期 ($j=1、2、3、4$ 分别代表分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期以及成熟期)。DAT 代表时间 (移栽或播种后的天数), $A_0、A_1、A_2、A_3$ 为参数。

2.2.2 施肥量与分次施肥 水稻在不同生育阶段具有不同的生长发育特性, 结合水稻的生理特性及对养分的需求进行施肥管理, 可使水稻获得较高的产量。研究表明^[19-20,4]: 如果施肥次数过少, 会造成 N 的大量流失和浪费, 不利于 N 素利用率的提高; 如果施肥次数过多, 会增加用工量和劳动成本。从环境和经济效益整体来考虑, 假定一季水稻最多施用 4 次 N 肥, 即分别在移栽前 (基肥, BS), 分蘖初期 (ET), 幼穗分化期 (PI) 和抽穗期 (FL) 施用 N 肥, 施 N 量分别为 $FN_b、FN_1、FN_2、FN_3$ 。施 N 总量为 TFN 是通过 NuDSS 计算得到的^[15], 单位为 kg/hm²。

$$\begin{cases} FN_b = a \times TFN \\ FN_1 = b \times TFN \\ FN_2 = c \times TFN \\ FN_3 = d \times TFN \end{cases} \quad (2)$$

其中, $a + b + c + d = 1$, $a、b、c、d$ 为分次施肥占总施肥量的比例。

2.2.3 不同时期施 N 量与植株吸 N 量的关系 水稻对 N 的吸收除了受土壤潜在供肥能力的影响外, 还分别受施 N 量影响。有研究表明^[21-22], 前期施用过多的 N 肥不利于植株的高产, 齐穗以后植株吸 N 速率降低, 应该把 N 肥多施于营养生长和生殖生长并进生长期。N 肥应该采用前肥后移的栽培措施, 把重施基肥、分蘖肥的

施肥方法改为重施分蘖肥、穗肥和粒肥的全生育期施肥法。研究发现，分蘖中期吸N量受 FN_b 和 FN_1 影响，幼穗分化期也受 FN_b 和 FN_1 的影响，抽穗期受 FN_b 、 FN_1 以及 FN_2 的影响，成熟期受 FN_b 、 FN_1 、 FN_2 、以及 FN_3 的影响。函数关系如式(3)：其中， B_j 、 E_j 、 F_j ($j=1, 2, 3, 4$ 分别代表分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期以及成熟期)是参数， NA_1 、 NA_2 、 NA_3 、 NA_4 分别为4个生育期植株吸N量。

2.2.4 各个生育期生物量与植株吸N量的关系

研究表明^[23]，水稻从移栽至拔节、拔节至抽穗的干物质积累量均随施N量的增加而增加，而抽穗至成熟的干物质积累量先随施N量增加而增加，但增加到一定值后反而下降。 DMA_1 、 DMA_2 、 DMA_3 、 DMA_4 分别为分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期、以及成熟期的生

物量，单位用 kg/hm^2 。结合数据库，各个生育期的生物量与吸N量的关系如式(4)，其中， H_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$)为各个阶段DMA的取值范围， C_0 、 C_j 和 D_j ($j=1, 2, 3, 4$)为参数。

2.2.5 产量与各个生育期生物量的关系 水稻产量的形成过程，其实质是干物质生产、分配、运转的过程。水稻营养生长阶段的干物质积累是后期产量形成的重要基础，稻谷产量的高低不但取决于干物质的生产量及其向籽粒运转分配的比例，同时也取决于不同生育阶段生物量的比例。有研究表明，前期干物质积累量过高并不有利于产量的提高。利用DPS软件对水稻不同生育期的生物量以及产量之间的关系进行逐步回归分析如式(5)，其中，GY为产量， F 、 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 为参数。

$$(3) \begin{cases} NA_1 = NA_1(0) + B_1 \times (FN_b + FN_1)^2 + E_1 \times (FN_b + FN_1) + F_1 \\ NA_2 = NA_2(0) + B_2 \times (FN_b + FN_1)^2 + E_2 \times (FN_b + FN_1) + F_2 \\ NA_3 = NA_3(0) + B_3 \times (FN_b + FN_1 + FN_2)^2 + E_3 \times (FN_b + FN_1 + FN_2) + F_3 \\ NA_4 = NA_4(0) + B_4 \times (FN_b + FN_1 + FN_2 + FN_3)^2 + E_4 \times (FN_b + FN_1 + FN_2 + FN_3) + F_4 \end{cases}$$

$$(4) \begin{cases} DMA_1 = f(NA_1) = C_1 \times NA_1 + D_1 & (H_1 \leq W_1 \leq H_2) \\ DMA_2 = f(NA_2) = C_2 \times NA_2 + D_2 & (H_3 \leq W_2 \leq H_4) \\ DMA_3 = f(NA_3) = C_0 \times (NA_3)^2 + C_3 \times NA_3 + D_3 & (H_5 \leq W_3 \leq H_6) \\ DMA_4 = f(NA_4) = C_4 \times NA_4 + D_4 & (H_7 \leq W_4 \leq H_8) \end{cases}$$

$$(5) \quad GY = F + E_1 \times DMA_1 + E_2 \times (DMA_2 - DMA_1) + E_3 \times (DMA_3 - DMA_2) + E_4 \times (DMA_4 - DMA_3)$$

前述方程(方程组)(1)~(5)中的参数是通过田间试验(数据库I中试验3以及数据库II)的试验数据，应用系统分析方法以及回归分析方法确定的。

2.3 ONIR 的组建

把计算最佳需肥总量的系统 NuDSS 和 N 肥分

次施用模型 NSAM 组装连接起来形成 N 肥优化决策支持系统 ONIR，在双核 CPU、1G 内存计算机、中文 Windows XP 的环境中运行。模型运行后产生的水稻植株各个生育期的 N 含量、各个生育期的干物质积累量以及水稻产量的模拟值与实测值的对比结果分别见图1、图2和图3。

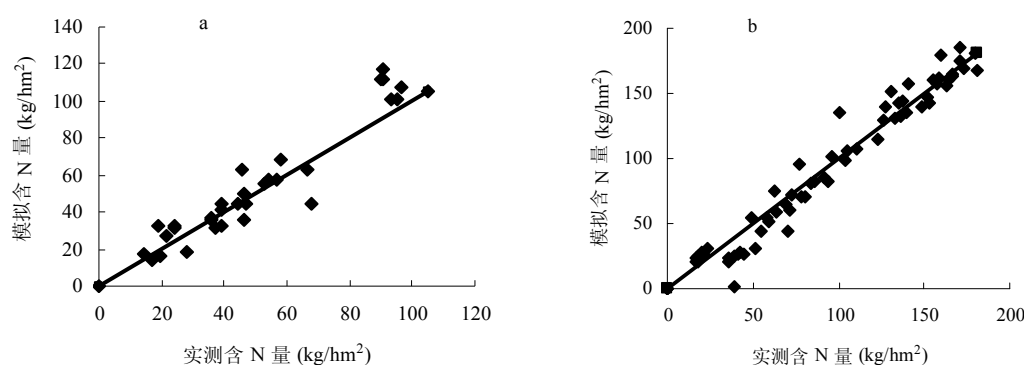


图1 水稻植株各个生育期的N含量模拟值与实测值的对比图(图中a、b分别代表晚稻和中稻,下同)

Fig. 1 Comparison between simulated and observed values of NA of rice at different stages

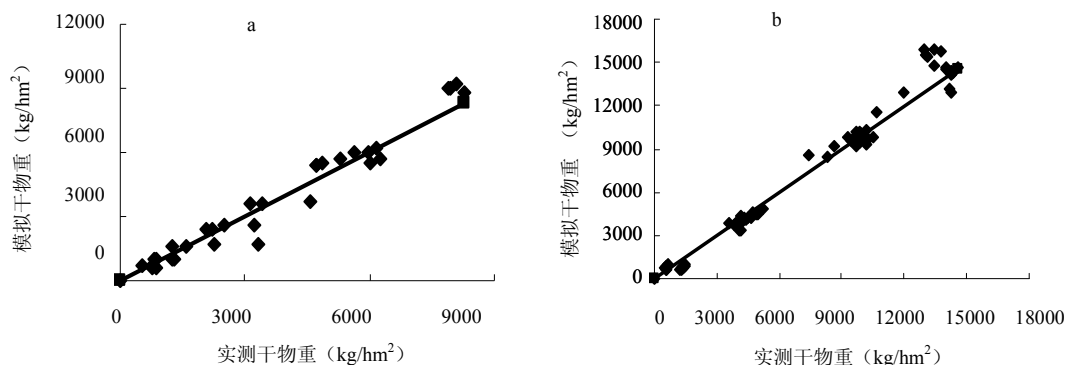


图 2 水稻植株各个生育期的干物质积累量模拟值与实测值的对比图

Fig. 2 Comparison between simulated and observed values of DMA of rice at different stages

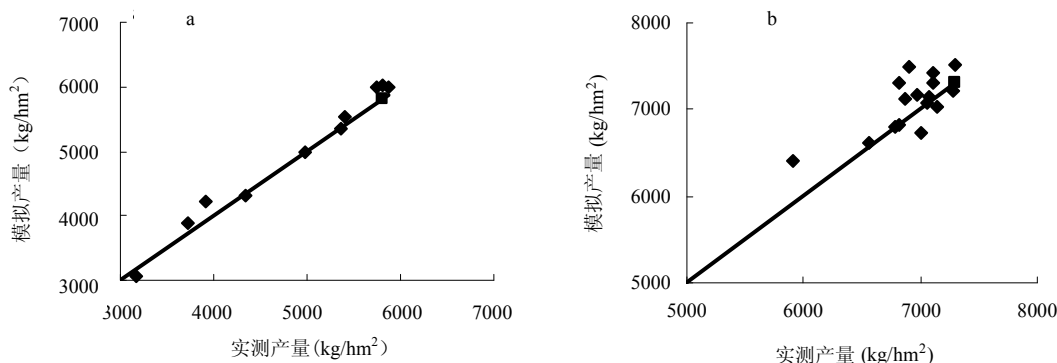


图 3 水稻模拟产量与实测产量的对比图

Fig. 3 Comparison between simulated and observed value of rice yield

3 系统检验

不少学者认为很难用单一的检验方法来评价一个模型的好坏^[24,9]。因此,本文采用图解和回归分析相结合的方法来对系统ONIR进行检验。图解法采用观测值与模拟值之间 1:1 对应关系以直观展示模型的预测精度;回归分析评价法则采用模拟值与实测值线性回归分析的斜率 α ,截距 β 和确定系数 R^2 , t 检验的显著性,规范均方根(RMSE normalised)和均方根误差(RMSE absolute)等对模型模拟效果进行评价。规范均方根和均方根误差的计算公式为:

$$\text{RMSE normalised} = 100 \left(\left(\frac{\sum_{i=1, \dots, n} (Y_i - O_i)^2}{N} \right)^{0.5} \right) / \bar{O} (\%) \quad (6)$$

$$\text{RMSE absolute} = 100 \left(\left(\frac{\sum_{i=1, \dots, n} (Y_i - O_i)^2}{N} \right)^{0.5} \right) \quad (7)$$

其中, Y_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值, $\bar{O}$ 为所有检测值的平均值, N 为样本数。

本研究中,利用数据库 I 中的试验 1、2、4 对系统进行检验。从图 1、图 2 和图 3 可以看出,模型可以较好地模拟不同施 N 水平下水稻各个生育阶段 N 和干物质的积累以及水稻的产量。从表 3 可以看出,各个生育期的含 N 量、干物质的积累量以及水稻产量的模拟值与观测值的平均值。线性回归 t 检验平均 > 0.05 ,斜率 α 在 0.847 ~ 1.034 之间,确定系数 R^2 在 0.85 ~ 0.99 之间,均方根误差为 1 ~ 110 kg/hm²,规范均方根为 9% ~ 24%。由此可见模型 ONIR 可以较

好地模拟不同施N水平下的干物质积累量和产量。

表 3 模拟值与实测值的回归分析评价

Table 3 Regression evaluations for ONIR simulation values of NA, DMA and grain yield for validation data

水稻品种	参数	N	X _{mea} (SD)	X _{sim} (SD)	P(r*)	α	β	R ²	RMSE absolute	RMSE normalid
晚稻	氮积累量NA (kg/hm ²)	40	53 (34)	53 (34)	0.08*	1.027	1	0.93	1	18
	干物质DMA (kg/hm ²)	40	3500 (2712)	3620 (2826)	0.06*	1.023	38	0.96	64	16
	产量 (kg/hm ²)	10	4965 (1764)	5047 (1729)	0.06*	0.974	213	0.99	44	24
中稻	氮积累量NA (kg/hm ²)	56	95 (55)	94 (58)	0.38*	1.034	-4.1	0.96	1.1	12
	干物质DMA (kg/hm ²)	56	6596 (4667)	6400 (4427)	0.06*	0.925	303	0.95	107	16
	产量 (kg/hm ²)	14	6260 (1414)	6209 (1305)	0.66*	0.847	906	0.85	110	9

注：N，样本数；X_{mea}，实测值的平均值；X_{sim}，模拟值的平均值；P(r*)代表t检验的显著性； α ， β ，R²分别代表线性回归曲线的斜率、截距和确定系数；RMSE Absolut，均方根误差；RMSE(%)normalid，规范均方根。*，模拟值与实测值达到 95% 的置信度。

4 结果与分析

4.1 利用 ONIR 来估算最佳的 N 肥用量

4.1.1 水稻目标产量的确定 水稻产量是由当地的气候、土壤条件、水稻品种和作物管理决定的^[25]。在农民的常规施肥管理下，协优 46 和汕优 63 目前平均的实际产量是 6.5 t/hm² 和 7.5 t/hm²。根据WOFOST模拟的水稻潜在产量^[26]，浙江地区水稻的目标产量确定为 7.3 t/hm²（晚稻）和 8.3 t/hm²（中稻）。该目标产量超过实际产量的 10%，大约是潜在产量的 70%（中稻）和 75%（晚稻）左右。

4.1.2 土壤养分的潜在供给 土壤养分的潜在供给定义为：在其他养分充足供应时，缺肥小区植株地上部对该种养分的吸收量。因此，通过不施 N 但 PK 充足的小区来估算土壤 N 的潜在供应，不施 P 但 NK 充足的小区来估算 P 的潜在供应，不施 K 但 NP 充足的小区来估算 K 的潜在供应。

利用不施肥空白小区作物的产量作为土壤养分潜在供给的指标比测定植株地上部养分的吸收量更实

际，更有效^[27]。金华地区水稻N限制产量、P限制产量和K限制产量具体数值见表 4。中稻（汕优 63 和两优培九）和晚稻（秀水 11 和优 46）的N限制产量分别为 5.0 ~ 6.0 t/hm²和 4.5 ~ 5.5 t/hm² ^[28,4]。

4.1.3 计算水稻N的需求量 肥料的用量可以通过以下一般公式来计算^[29]

$$Y = f(Y_m, U_1, \dots, U_x) \quad (8)$$

$$Fx = (Ux - ISx) / Rx \quad (9)$$

式中，Y 为目标产量，Y_m 为某地区某个品种的产量潜力，U_x 为获得目标产量所需的养分，F_x 为获得目标产量所需的施肥量，IS_x 为土壤养分的潜在供给，R_x 为养分的回收效率。

输入ONIR的数据见表 4，模型运行后的输出结果见表 5，根据输出结果，中稻目标产量为 8.3 t/hm²时N肥的需求量是 150 kg/hm²，晚稻目标产量为 7.3 t/hm²时N肥的需求量是 120 kg/hm²。肥料N的用量大约是当前肥料N用量的 70%，农民常规施肥超过了水稻需求的 30%，这可能是稻田N肥利用率低的一个重要原因。

表 4 输入数据

Table 4 Input parameters to ONIR for calculations of fertilizer requirements

品种	产量潜力 (t/hm ²)	N 限制产量 (t/hm ²)	P 限制产量 (t/hm ²)	K 限制产量 (t/hm ²)	目标产量 (t/hm ²)	肥料的回收效率		
						N	P	K
汕优 63	12.0	5.5	7.5	7.0	8.3	0.40	0.25	0.45
两优培九	12.5	5.5	7.5	7.0	8.3	0.40	0.25	0.45
秀水 11	9.5	5.0	6.5	6.0	7.3	0.40	0.25	0.45

协优 46	10.0	5.0	6.5	6.0	7.3	0.40	0.25	0.45
-------	------	-----	-----	-----	-----	------	------	------

表 5 ONIR 输出结果

Table 5 Fertilizer requirements calculated by ONIR

品种	目标产量(t/hm ²)	肥料的需求量 (kg/hm ²)
汕优 63	8.3	150
两优培九	8.3	150
秀水 11	7.3	120
协优 46	7.3	120

4.2 利用 ONIR 确定的 N 肥最佳施用方案

表 6 N 肥最佳的分次施用方案

Table 6 Optimal application patterns for N Fertilizer

品种	施肥总量 (kg/hm ²)	施肥次数	施肥比例	产量 (t/hm ²)
晚稻	120	3	0.4 : 0.2 : 0.4 : 0	7.3
		4	0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2	7.3
中稻	150	3	0.4 : 0.2 : 0.4 : 0	8.3
		4	0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2	8.3

5 讨论和结论

近年来,一些水稻N肥优化模型已经建立并在一些地区得到了应用^[4,10-12,30]。但是这些水稻模型都比较复杂,需要的参数比较多,而且有些参数的获取比较困难,这就限制了这些模型的进一步应用。本研究在N肥决策支持系统NuDSS的基础上,密切联系浙江水稻的生理生长过程,建立了N肥优化决策支持系统ONIR。

目前国内关于N肥的分次施用模式的报道很多,以前的研究认为,N肥的施用主要集中在移栽前(基肥)和分蘖早期。近年来的研究认为,水稻吸N总量的一半以上是在水稻生长中期吸收的,幼穗分化期后肥料的施用可以使N、P、K有比较稳定的供给,从而提高水稻的产量^[31-22]。

本研究认为,N肥作基肥以及在分蘖前期、幼穗分化期和抽穗期的施用应该保持相对均衡。适当减少前期施N比重,增加中后期施N比重,可有效地防止生育中期群体过大,改善群体通风透光条件,使后期单茎叶面积较大,含N量、叶绿素含量均较高,有利于光合产物的增加,即“源”较充足;同时,由于适当增加中期施N比重,减少弱势颖花退化,为穗大、粒多奠定基础,增大了“库”的容量;在单茎生长健壮的

浙江金华地区连作晚稻和中稻的目标产量分别确定为 7.3 t/hm² 和 8.3 t/hm²,最佳N肥用量分别为晚稻 120 kg/hm²、中稻 150 kg/hm²左右(表 5)。利用系统 ONIR推荐的N肥最佳分次施用方案晚稻为 0.4 : 0.2 : 0.4 : 0 或 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2,中稻为 0.4 : 0.2 : 0.4 : 0 或者 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2,分别于水稻移栽前(基肥)、分蘖前期、幼穗分化期和抽穗期施用(表 6)。可根据实际情况,在水稻整个生长期按比例分次施肥 3 次或者 4 次,两种施肥方式对产量的影响不大。

同时,维管束数目也相应增加,有利于光合产物的转运,即“流”畅通。由于“源”足、“库”大、“流”畅,每穗粒数、结实率和千粒重等产量构成因素均提高,最终可以形成较高的产量。

杨京平等^[12]和傅庆林等^[32]均用MANAGE-N对浙江水稻的最佳N肥施用量进行过模拟。杨京平等^[12]认为大田晚稻的最佳经济施N量为 160 kg/hm²,最佳的施肥方案是在水稻移栽后的 5、20、30 和 40 天以 0.2 : 0.3 : 0.3 : 0.2 的比例施入。傅庆林等^[32]则认为将 180 kg/hm²的N肥按 0.4 : 0.3 : 0.15 : 0.1 的比例分别于移栽后 0、14、21 和 28 天施入比较经济合理。本研究中,中稻汕优 63、两优培九和晚稻秀水 11、协优 46 是金华地区的主要水稻品种,在金华地区的气候条件下,运用WOFOST模拟的秀水 11、协优 46、汕优 63、两优培九的潜在产量分别为 9.5、10、12.5、13 t/hm²。根据水稻的潜在产量、当地土壤的潜在养分供应能力以及当地的作物管理水平,目标产量可以确定为 7.3 t/hm²(晚稻)和 8.3 t/hm²(中稻)。利用ONIR模型推荐,中稻目标产量为 8.3 t/hm²时N肥的需求量是 150 kg/hm²,晚稻的目标产量为 7.3 t/hm²时N肥的需求量是 120 kg/hm²。施肥方案晚稻为 0.4 : 0.2 : 0.4 : 0 或

0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2, 中稻为 0.4 : 0.2 : 0.4 : 0 或者 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2, 分别于水稻移栽前(基肥)、分蘖前期、幼穗分化期和抽穗期施用。肥料N的用量大约是当前肥料N用量的 70%。这一方面说明目前的水稻产量还有潜力可挖, 另一方面说明通过改进管理措施在降低一定N肥用量的情况下不会影响水稻的产量。

综上所述, 系统 ONIR 能够较好地为浙江水稻生产提供最佳施肥方案, 该模型的优点是需要的输入数据少, 推荐的结果实用。但是, 由于系统主要以浙江的试验和经验公式为基础, 原则上只适用于浙江地区, 要扩大应用范围, 还需要进一步的完善和校正。

参考文献:

- [1] 王国强, 周静, 崔键, 刘方平, 梁举, 李辉信. 不同水肥组合对红壤地区早稻产量及氮肥利用率的影响. 土壤, 2008, 40(3): 392-398
- [2] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 朱兆良, 石孝均. 不同施氮量和施氮方式对稻田氮挥发损失的影响. 土壤, 2006, 38(3): 263-269
- [3] Wang GH, Dobermann C, Witt Q. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China. Agron. J., 2001, 93: 896-878
- [4] Peng SB, Buresh RJ, Huang JL. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Research, 2006, 96: 37-47
- [5] Kimura J, Chiba H. Studies on the efficiency of nitrogen absorbed by the rice plant for the yields of grain and straw. J. Sci. Soil Manure Jpn., 1943, 17: 479-497
- [6] Ueno M, Kumagai K, Sato Y. Soil nitrogen and its release from fertilizer and the application technique using all fertilizer as basal fertilizer(1): The pattern for the release of nitrogen from fertilizers. Agric. Hortic., 1990, 65: 828-834
- [7] Zacharias TP, Huh MY, Brandon DM. Use of plant tissue analysis in an economic decision making model: An application to nitrogen fertilization in rice production. J. Prod. Agric., 1989, 2: 116-121
- [8] Pirmoradian N, Sepaskhah AR. A very simple model for yield prediction of rice under different water and nitrogen applications. Biosystems Engineering, 2006, 93: 25-34
- [9] Bouman BAM, van Laar HH. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA 2000 under nitrogen-limited conditions. Agricultural Systems, 2006, 87: 249-273
- [10] Ten Berge HFM, Thiagarajan TM, Shi QH. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part 1. Description of MANAGE-N. Field Crop Research, 1997, 51: 29-42
- [11] Ten Berge HFM, Shi QH, Zheng ZM. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part 2. Field evaluations. Field Crop Research, 1997, 51: 43-54
- [12] 杨京平, 姜宁, 陈杰. 施氮水平对两种水稻产量影响的动态模拟及施肥优化分析. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1654-1660
- [13] 张俊, 徐绍辉, 刘建立, 张佳宝, 范晓晖. 应用 ORYZA2000 模型模拟水稻产量及吸氮量. 土壤, 2007, 39(3): 428-432
- [14] Witt C, Fairhurst TH, Sheehy JE. A nutrient decision support system (NuDSS) for irrigated rice. Los Banos, Philippines: IRRI and Singapore: PPI/PPIC and IPI, 2005
- [15] 严力蛟. 水稻生产优化管理模拟系统研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2003
- [16] 杨京平, 姜宁, 陈杰. 水稻吸氮量和干物质积累的模拟试验研究. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 318-324
- [17] 傅庆林. 水稻生长动态与氮素平衡模拟(博士学位论文). 杭州: 浙江大学, 1999
- [18] 李临颖, 吴元中. 氮素对水稻生长效应的数值模拟. 上海农业学报, 1992(8): 76-78
- [19] 谢金学, 谭和芳, 薛冬娥, 郑网宇. 水稻优质高产精确施氮参数研究. 土壤, 2006, 38(3): 342-345
- [20] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 郑洪福, 孙军华. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥施氮效应和几种氮肥利用率的研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(1): 60-64
- [21] 杨从党, 朱德峰, 应继锋, 张玉屏, 林贤青, 袁平荣, 周能, 周玉萍. 高产水稻对氮的吸收、分配和利用研究. 西南农业学报, 2006, 19(3): 400-403
- [22] Lin XQ, Zhou WJ, Zhu DF. Nitrogen accumulation, remobilization and partitioning in rice under an improved irrigation practice. Field Crops Research, 2006, 96: 448-454
- [23] 杨益花, 张亚洁, 苏祖芳. 施氮量对杂交水稻产量构成因素和干物质积累的影响. 天津农学院学报, 2005, 12(1): 8-11
- [24] Kobayashi K, Salam MU. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. Agronomy Journal, 2000, 92: 345-352
- [25] Dobermann A, Witt C, Dawe D. Increasing the productivity of intensive rice systems through site-specific nutrient management. Field, NH (USA) and Los Baños (Philippines): Science Publishers, Inc., and International Rice Research Institute (IRRI), 2004
- [26] Xie WX, Yan LJ, Wang GH. The simulation and validation of rice potential growth process in Zhejiang by utilizing WOFOST Model. Rice Science, 2006, 13(2): 125-130
- [27] Dobermann AC, Witt C, Dawe D, Gines GC, Nagarajan R, Satawatananont S, Son TT, Tan PS, Wang GH, Chien NV. Soil

- fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. *Agron. J.*, 2003, 95: 913–923
- [28] Wang G, Sun Q, Fu R, Huang XH, Wu J, He YF, Dobermann A, Witt C. Site-specific nutrient management in intensive irrigated rice systems of Zhejiang Province, China // Dobermann, A., Witt, C., Dawe, D. *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems Through Site-specific Nutrient Management*. Science Publishers Inc., Enfield NH, USA, and International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines, 2004
- [29] Mitchell P. Misuse of regression for empirical validation of models. *Agricultural Systems*, 1997, 54: 313–326
- [30] 卞立平, 焦隼, 李慧, 张卫建. 南京地区水稻田 N 素径流流失模拟模型. *生态与农村环境学报*, 2008, 24 (3): 89-93
- [31] 郑志明, TenBerge HFM. 水稻氮肥管理的 ORYZA-0 模型之理论及验证. *浙江农业大学学报*, 1994, 20: 611–616
- [32] 傅庆林, 王建红, 丁能飞, 林义成, 俞劲炎, 陈英旭. 水稻生产的氮肥优化模拟研究. *浙江农业学报*, 2002, 14(3): 125–130

ONIR—A Decision Support System for Optimization of Nitrogen to Irrigated Rice in Zhejiang Province, China

XIE Wen-xia¹, XU Shao-hui¹, WANG Guang-Huo²

(1 College of Chemistry and Environment Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

2 College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: Based on the results of field fertilization experiments of rice conducted in Zhejiang Province, China, a decision support system for Optimization of Nitrogen to Irrigated Rice (ONIR) was developed, calibrated and validated. The system included NuDSS (the nutrient decision support system) and N Splitting Application Model (NSAM). NuDSS was a recently developed software for irrigated rice based on QUEFTS and SSNM, which was used to optimize nutrient management for rice varieties. According to NuDSS, the optimal fertilizer N requirement for the target yields could be calculated. We developed NSAM that could make sure N splitting application which based on the rhythm of growth and development of rice and nutrient balance. The results showed that the observed and simulated values of NA and DMA at different stages and grain yields at different N treatments fell near the 1:1 lines in the main. Values of α , R^2 were in the range of 0.847 ~ 1.034 and 0.85 ~ 0.99, respectively. All $P(t^*)$ were larger than 0.05, yields absolute RMSE varied from 1 to 110 kg/hm² and normalized RMSE varied from 9% – 24%. The attainable target yields were set to 70 to 75 percents of their potential yields. The attainable targets of late rice and middle rice in Zhejiang were 7.3 and 8.3 t/hm² according to the potential yield simulated with WOFOST. On reasonable yield targets of late rice and middle rice in Zhejiang, the optimal fertilizer N requirement recommended by ONIR was about 120 kg/hm² with splitting fractions of 0.4 : 0.2 : 0.4 : 0 or 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2 and 150 kg/hm² with splitting fractions of 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0 or 0.4 : 0.2 : 0.2 : 0.2 as basal, at early tillering, panicle initiation and flowering stages, respectively. N application was only about 70% of the fertilizer N application under current farmers' practice. N input could be reduced in some degree without yield loss if rice N management practice were improved in Jinhua of Zhejiang Province.

Key words: Model, Nitrogen optimization, Rice, Validation