

# 动态数据驱动应用系统在农业和环境科学中的应用前景\*

欧阳颖<sup>1</sup> 骆世明<sup>2</sup> 崔理华<sup>3</sup> 廖新伟<sup>4</sup> 章家恩<sup>2</sup> 秦 钟<sup>2</sup>

(1. Department of Water Resources, St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida 32178, USA;

2. 华南农业大学农学院 广州 510642; 3. 华南农业大学资源和环境学院 广州 510642;

4. 华南农业大学动物科学院 广州 510642)

**摘要** 目前使用的系统动力学模型往往由于输入数据与实际系统不同步,引起对预测和调控的误差和失败。动态数据驱动应用系统(Dynamic Data Driven Application System, DDDAS)以动态运作方式,集实时模拟、实时测量、自动反馈和控制管理于一体能够有效克服传统模拟存在的问题。本文简述了 DDDAS 提出的历史背景和基本概念,以该系统在农田温室气体排放、农田定量灌溉和河流污染监控中的具体应用为例,进一步阐明了 DDDAS 在农业和环境科学中应用的思路和方法。并提出 DDDAS 应用中需要解决的一些具体问题。

**关键词** 动态数据驱动应用系统 模拟预测 实时测量 环境污染 农业灌溉 温室气体 无线传感器  
**中图分类号**: S126; S181 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2008)06-1597-06

## Prospect of Dynamic Data Driven Application System in agricultural and environmental applications

OUYANG Ying<sup>1</sup>, LUO Shi-Ming<sup>2</sup>, CUI Li-Hua<sup>3</sup>, LIAO Xin-Di<sup>4</sup>, ZHANG Jia-En<sup>2</sup>, QIN Zhong<sup>2</sup>

(1. Department of Water Resources, St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida 32178, USA;

2. College of Agronomy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. College of

Resources and Environmental Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

4. College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract** At present, most input data in system dynamic modeling are not able to synchronize with real-world conditions, which often results in inaccurate predictions and/or failure of system control. Dynamic Data Driven Application System (DDDAS) is an innovative paradigm in which real-time computer simulations and measurements, system automated feedback and applications/managements are dynamically integrated. It effectively overcomes setbacks in traditional simulation approaches. This paper is an overview of the emergence and basic concepts of DDDAS and describes the rationale and methodology of DDDAS application in agricultural and environmental sciences through case studies of greenhouse gas emission, irrigation control in crop production and monitoring water pollution in river system. Specific limitations of DDDAS are also discussed.

**Key words** DDDAS, Computer modeling prediction, Real-time measurement, Environmental contamination, Agricultural irrigation, Greenhouse gas, Wireless sensor

(Received Dec. 20, 2007; accepted Feb. 20, 2008)

自 20 世纪 80 年代以来,由数学模型、实验设施、计算机软硬件技术组成的模拟分析系统越来越广泛地应用于科学研究和生产管理中。随着数学模型的日趋完善、实验设施的不断改进以及硬件技术的迅速更新,模拟分析系统已成为人类探索自然和社会发展规律不可缺少的重要手段之一。目前,使用模拟分析系统的主要步骤是:把早期测量的实验数据输入到数学模型中,然后利用这些数学模型

预测现时或未来的系统变化。在这些数学模型运行时,输入的实验测量参数值通常是不随时间而改变的。这种传统的模拟方法,对预测一些动态变化程度较低的简单系统,是有效可行的。然而,由于早期测量的实验数据不能及时和准确地反映动态系统的实时变化状况,利用它们作为输入数据,模拟结果往往不能有效地预测瞬息万变的现实世界,有时甚至会得出十分荒谬的结论。例如,在模拟预测

\* 欧阳颖(1959~),男,博士, Environmental Scientist/Hydrologist, 主要从事环境和水文科学研究。E-mail:ouyangy@ufl.edu

收稿日期:2007-12-20 接受日期:2008-02-20

农作物产量时,通常把过去几年测量的气象条件(如降雨和气温)、土壤状况(如养分含量、水分含量、土温变化)、作物生长资料以及病虫害情况等数据输入到数学模型中,然后用这个模型来预测未来几年的农作物产量。若过去几年测量的输入数据不能代表未来几年的田间实时条件,那么就可能会得出错误的预测结果。总之,这种在模型运行时不能输入实时测量数据的传统方法,或者说这种模型运行和输入数据不能同步协调进行的缺陷,已经严重地阻碍了人类对复杂动态变化系统的模拟预测。

## 1 DDDAS 提出的历史背景

为了解决这一模拟预测的技术难题和挑战,美国国家科学基金会于 2000 年提出了一个全新的模拟预测分析系统——动态数据驱动应用系统(Dynamic Data Driven Application System 或简称 DDDAS)<sup>[1,2]</sup>。这一基本概念的提出有两个起因:一是气象学家不能用现有的模拟预测技术准确、及时地预报于 2000 年 1 月 24~25 日发生在美国的一场暴风骤雨。这场自然灾害横扫了美国南卡罗来纳州和新英格兰州的很多大城市;二是救援学家不能准确地预测发生在美国 Los Alamos 国家实验室附近的野火实时蔓延情况,使救援人员不能及时地采取有效方法和措施扑灭野火。科学家们把这两次模拟预测失败的原因归于模型运行时所采用的输入数据。这些输入数据不能实时地反映出自然条件的真实变化状况。因为这些模型运行时,很多输入参数值都是早期测定和固定不变的。而在现实世界和自然条件下,这些参数值往往是随时间而改变。这种以不变的输入参数值来预测万变的动态系统的传统方法通常会产生很大误差,甚至出现预测和控制的失败<sup>[2]</sup>。

动态数据驱动是一种共生的反馈控制系统。在这个系统中,系统模拟模型的运行结果可用来指导实验设施,并指令这些实验设施的放置地方、放置时间和测量方法,在接收了新测定的实验数据后,模型进行下一轮的模拟预测,并且指导和控制实时数据测量过程。这些模型预测和实验测量是通过计算机、测量仪器、无线传感器等硬件和数学模型、可视化、用户联接等软件来完成的<sup>[2]</sup>。这种 DDDAS,不但可提供更加精确、及时、有效的模拟预测结果,而且还能强化模型预测技术和改善实验测量方法<sup>[3-9]</sup>。近年来,先进的计算方法如网格法和成熟的软件系统已经取得了很大的发展。与此同时,实验测量设施如无线传感器联网系统、数据储存技术、遥控数据接收技术也已成熟<sup>[3]</sup>。这些先进的计算技术和成熟的实验测量方法为建立和推广

DDDAS 提供了良好的平台。

DDDAS 目前正处于初步发展阶段,相关文献仅涉及自然灾害预报和救援方面的研究<sup>[5,7,8]</sup>,在农业和环境科学中的应用至今鲜有报道。因此,如何把 DDDAS 引进到我国农业和环境科学研究和应用中,是科研工作者所面临的重要任务之一。成功地使用 DDDAS 很可能会像 20 世纪 50 年代计算机问世一样,对科学研究、生产管理与社会生活带来革命性的改变<sup>[2]</sup>。

## 2 DDDAS 的基本概念

DDDAS 以实时动态运作的方式,集模拟预测、实验测量、自动反馈(软件应用)和控制管理于一体。通常一个 DDDAS 是由用户控制、动态运算设施、实时数据收集设施、动态可视设施 4 个部分组成的一个共生反馈控制系统(图 1)。动态运算设施包括硬件如计算机和软件如数学模型和计算方法,主要用来进行模拟运算预测;实时数据收集设施主要有测量仪器如无线传感器、数据储存器、遥控接收器等以及气象资料和地理信息系统,主要用来进行实时测量;动态可视设施主要由屏幕和可视化软件支持组成,提供可视化模拟预测和实时测量结果,还可以按需要自动指导和调节模拟运算和实验测量,并具备转换不同模拟算法和选择不同测量仪器的能力;用户控制通过动态可视设施来实施对动态运算和实时数据收集设施的控制和管理。

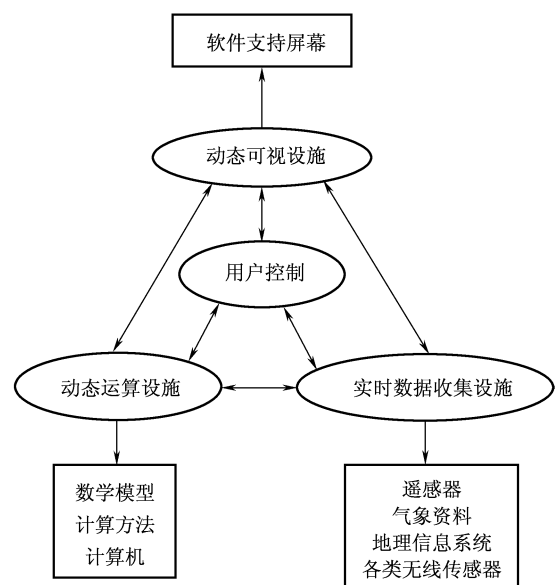


图 1 动态数据驱动应用系统的基本结构

Fig. 1 Basic framework of DDDAS

Mandel 等<sup>[7]</sup>应用 DDDAS 模拟预报实时野火蔓延趋势。如图 2 所示,DDDAS 包括气象预测和野火预测的数学模型、信息采集自动控制模型、可视化

的用户界面软件以及与硬件交换信息的设施。数学模型接收来自于气象站、地理信息系统、航卫照片和多个安装在现场的各种无线传感器发来的数据。信息采集自动控制模型引导实验设施进行测量和指令数学模型进行多种形式的运算,利用模型运算结果和野外测量结果进行比较,然后调整模型的输入参数值使模拟预测能及时有效地反映野火

蔓延趋势。可视化和用户界面软件则在屏幕上显示出模拟预测结果,并支持确定扑灭野火的对应措施。其中数学模型将在远处超级电脑上运行,而可视化和用户界面软件则在现场处理人员的无线上网的手提电脑数字助理器(Personal digital assistant)上运行。这样一个 DDDAS 将可以准确有效地预测发生在自然界的野火实时蔓延状况。

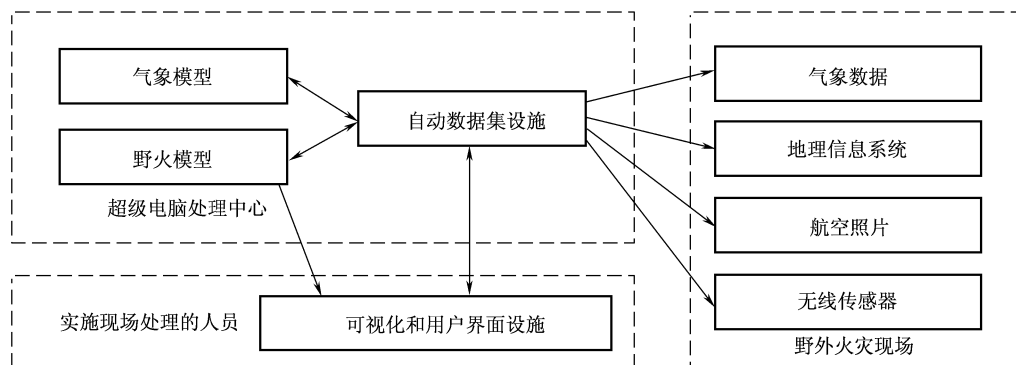


图 2 DDDAS 在预报实时野火蔓延中的应用

Fig. 2 Application of a DDDAS on forecasting the wild fire spreading

有害藻类的爆发(Harmful algal bloom)会严重地恶化水体生态系统。一些藻类如蓝毒素藻(Cyanobacteria)和有毒赤潮藻(Pfiesteria piscicida)可产生对动物和人类有害的毒素<sup>[10]</sup>。2007年太湖水质污染事件就是一个典型的藻类暴发例子。藻类暴发与水体温度、养分、光照,输入输出的水量、水质都有密切关系,建立一个有害藻类暴发的预警系统,将有利于采用恰当而及时的控制措施,例如控制污水输入,加大清洁水源输入等,有效控制藻类的暴发。目前,有害藻类暴发预报系统主要依赖卫星遥感和野外观测。然而,如何及时、准确和有效预报有害藻类暴发仍然是生态环境科学界的一个很大的挑战。显然,利用不变的输入参数值来模拟常变的水生态环境系统不能准确地预报瞬时发生的藻类暴发。为了更好地解决这一难题,欧阳颖等<sup>[1]</sup>建议使用 DDDAS。这个 DDDAS 主要包括无线传感器和计算机。无线传感器可用来连续和实时地测量水文条件和养分在水体中的含量,并及时向计算机输送测量结果。计算机内则装有数学模型和各种应用软件。这些软件可接收无线传感器传来的实时数据并进行处理,然后及时地输入到数学模型中进行模拟预测。预测结果将即时在屏幕上显示。用户通过分析这些预测结果来监控和预报水体藻类暴发情况。

### 3 DDDAS 在评估温室气体排放中的应用

氧化亚氮是重要的温室气体之一,大气中氧化

亚氮主要来源于农业生产。氧化亚氮有很强的吸收红外线能力,可捕捉与阻塞热量从地球表面向天空辐射而增加地球温度。据估计,氧化亚氮吸收红外线的的能力比二氧化碳强 300 倍<sup>[11]</sup>。

土壤中的氧化亚氮在微生物的硝化和反硝化作用下产生<sup>[11,12]</sup>。农业生产中的施肥、耕作、灌溉都可能增加氧化亚氮的产生和排放。施用化学肥料会增加土壤矿质氮含量,从而引发土壤中硝化和反硝化作用;有机质含量高的土壤,耕作使有机氮转化为矿质氮而增加土壤的硝化作用;灌溉可减弱作物体内的水分胁迫、增强微生物活力以及产生土壤厌氧条件而促进反硝化作用<sup>[13]</sup>。要正确评估农业生产中氧化亚氮的排放,降低农业生产对全球变暖的影响,就需要对产生氧化亚氮的过程进行模拟,其中涉及到土壤水分、温度、有机质、各种养分含量、土壤理化特性,也涉及土壤的各种输入输出,包括作物生长和施肥灌溉过程。

目前,评估氧化亚氮排放量的一个基本方法就是田间测量和模拟预测。近年来,DAYCENT 模型已被用来预测农业土壤氧化亚氮的排放量。DAYCENT 模型是 CENTURY 模型采用日为步长的版本<sup>[14]</sup>,可预测碳和氮在土壤、植被以及大气中的循环。DAYCENT 模型的几个关键子模型分别为土壤水分状况和温度变化模型、植物净初级生产分配模型、植物枯枝落叶和土壤有机质的矿化模型、植物养分的矿化模型、氮气在硝化和反硝化作用过程中的排放模型、甲烷在非饱和土层中的氧化模型。

Grosso 等<sup>[13]</sup>应用 DAYCENT 模型模拟了全美国农业土壤氧化亚氮 1990~2003 年的排放量。在模拟过程中,所用的输入参数主要包括 2001 年测量的气象数据如最大和最小日温和日降雨量(以此代表 2002 年和 2003 年的气象数据),2006 年检验过的土壤质地和水力性质数据,1993 年的自然植被分布图,2005 年美国环保局提供的作物土壤施肥量等。模拟研究结果为估计氧化亚氮在美国农业土壤中近 10 年的排放状况提供了有用的参考价值。然而,这种用早期测量而又不随时间变化的输入参数值来模拟未来和多变的氧化亚氮排放量,往往会增加模拟结果的不确定性。

为了更好地解决这一问题,可使用如图 3 所示的简单 DDDAS。这个 DDDAS 主要包括无线传感器和计算机。无线传感器如 TDLAS(Tunable diode laser absorption spectroscopy)可用来连续和实时地测量单位面积土壤中的氧化亚氮排放通量,并及时向计算机输送测量结果;计算机内则装有应用软件和如下氧化亚氮排放累积量计算公式:

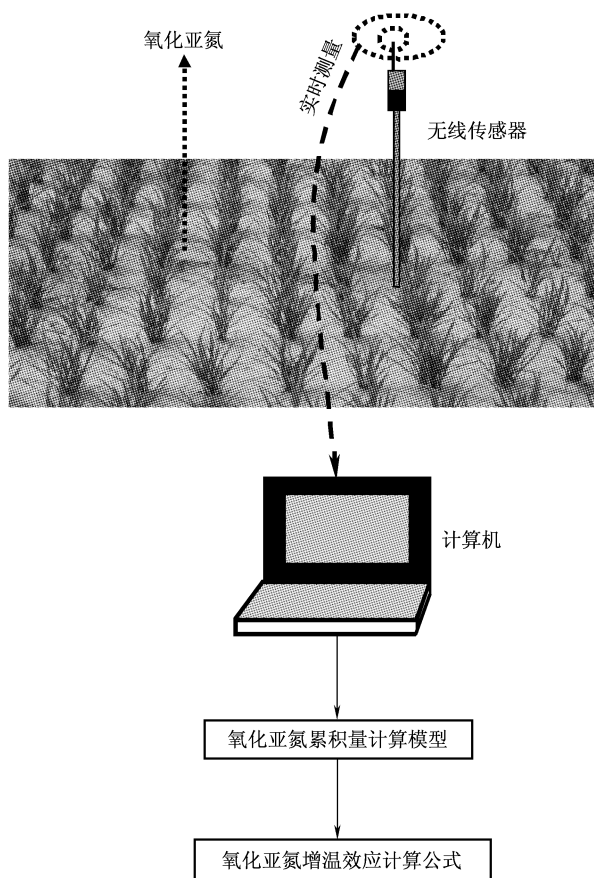


图 3 动态数据驱动应用系统在预报氧化亚氮温室效应中的应用

Fig. 3 Application of DDDAS on prediction of global warming from nitrous oxide

$$Y = nA \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$

其中,  $Y$  表示作物生长期农田氧化亚氮累计排放量 ( $\text{mg}$ ),  $n$  表示作物生长期 ( $\text{h}$ ),  $A$  表示农田总面积 ( $\text{m}^2$ ),  $F_i$  表示单位时间和面积的氧化亚氮排放通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )。应用软件可接收 TDLAS 传来的氧化亚氮排放通量的实时数据并进行处理,然后及时地输入到计算公式(1)中预测氧化亚氮在大面积农业区域中的累计排放量。利用这些累计排放量,可按下列公式计算氧化亚氮的总温室效应:

$$\text{总温室效应} = 275 \times Y \quad (2)$$

其中, 275 为氧化亚氮在 20 年尺度上的增温潜势<sup>[11]</sup>。这个 DDDAS 既不需要复杂的数学模型(如 DAYCENT)和繁多的输入数据,又可准确地评估氧化亚氮在复杂的气象、土壤与作物的动态条件下的排放量和温室效应。这个简单的 DDDAS 不仅可以评估农业生产中氧化亚氮的排放量,还可以预测其他温室气体如二氧化碳和甲烷等的排放量。因为无线传感器 TDLAS 可测量多种温室气体和其他挥发性气体。

#### 4 DDDAS 在农田灌溉中的应用

国内外多年实践表明,农田灌溉是一种最易提高干旱地区农业产量的方法之一。灌溉与无灌溉作物相比,谷物产量可提高 6 倍左右。我国很多地方的水资源短缺,解决用水问题的途径无非是开源与节流并举,开辟新的水资源或建设跨流域调水工程都是开源的办法,发展节水型农业是节流的重要方面<sup>[15]</sup>。

发展节水型农业方法之一是实施优化的灌溉制度,既保持土壤中作物生长所必需的水分,又最低限度地减少水分流失。近年来,许多计算机模型已被用于指导制订优化灌溉制度,其中在干旱地区较常用的模型是 ISAREG<sup>[16-19]</sup>。ISAREG 是一个预测和评估农作物灌溉制度的模型,主要用来预测在特定的土壤-气候-作物条件下的土壤水分平衡。该模型所需的输入参数主要有气象资料,如降雨量和蒸散量;土壤资料,如不同土层土壤水分总含量和有效水含量、灌溉深度以及地下水补给;作物资料,如不同时期作物生长系数、根系生长深度及水分和产量对应系数等。Liu 等<sup>[17]</sup>应用 ISAREG 模型模拟了河北省望都实验站的灌溉制度,并应用实验数据对该模型进行验证。研究表明,对于夏季玉米,其模拟土壤水分平均误差为 5.3%;而对于冬季小麦,其模拟土壤水分平均误差为 7.3%。虽然 ISAREG 模型对研究农作物灌溉制度提供有益的帮

助,然而这种用早期测量而又固定不变的输入参数值来模拟未来而又多变的土壤-气候-作物水分平衡系统,还很难达到最优节水灌溉。

DDDAS的建立可为发展节水型农业和实施优化灌溉制度提供了广阔的应用前景。DDDAS可由无线传感器、如ISAREG的数学模型以及计算机来组成。无线传感器用来连续和实时地测量土壤水分含量,并及时通过计算机及界面软件将数据输入数学模型中预测实时的作物水分需求量。根据预测结果,用户可以决定何时和何地启动或停止灌溉系统,这样一个节水和省能的DDDAS可为发展节水型农业开辟新途径。

## 5 DDDAS在河流污染监控中的应用

水流域环境污染和生态平衡破坏是国内外普遍存在和人类面临的严重危害之一,已引起各国政府和社会公众的高度关注和担忧<sup>[20]</sup>。不适当的垃圾和污水处理,不科学的存放工业废料,严重事故引起的毒物流失,过量的农药和化肥施用,不合理的土地、江河、海涂资源的开发,乱砍滥伐森林,都会引起水流域严重的环境污染和生态平衡破坏。珠江流域部分流经人口密集、工业发达区的河段,特别是部分内河小河涌的水质已劣于V类水。减少或根除污染源是治理河道污染和恢复河流生态功能的根本措施,这是涉及投资量大、实施周期长的一项系统工程。如果先通过科学研究,摸清污染物如何经地面径流、非饱和层淋失、地下水排泄等污染机制,找出主要污染源和主要污染物的排放当量、排放位置及其在河道内的衰减规律,然后再结合流域的自然环境状况和水文条件,制定出环境治理和生态修复措施,则可达到投资小、见效快的目的。

目前,国内外地表水污染物模拟预测主要使用基于地理信息系统(GIS-based)的数学模型如BASINS<sup>[20]</sup>和MIKESHE<sup>[21]</sup>以及连续的静态输入数据。这些输入数据通常是几年前测定的数据,往往不能代表地表水现时的水文生态环境条件,以此来预测常变的地表水污染状况,很易增加模拟预测结果的不确定性。为了准确地预测像珠江流域这样的河流污染状况,须实时地掌握该流域降雨量、蒸散量、水文特性、温度变化等自然条件。为此,有必要建立主要包括无线传感器、数学模型如BASINS-HSPF<sup>[22]</sup>、界面软件以及计算机的DDDAS,系统的无线传感器将有代表性地分布在不同河段(如支流出口处等)连续、实时测量水文条件和污染物在地表水中的含量,并及时地反馈给数学模型进行模拟预测,模拟预测结果应包括河流中污染物季节性和

年平均流量以及往珠江的排放量。用户通过分析这些预测结果来监控和预报河流污染状况,并为河流生态环境恢复措施的制订提供科学依据。

## 6 小结

本文综述了DDDAS提出的历史背景和基本概念,并以其在预报农业温室气体、发展节水型农业、监控河流污染中的应用实例,进一步阐明该系统在农业和环境科学中的意义。由于DDDAS正处于起步阶段,在建立DDDAS时,有几个技术问题尚待进一步改善:改善模拟预测和实时测量的相互反馈功能,提高测量仪器和应用软件自动连接性能的装置,提高处理混乱和不确定性高的测量数据的能力等。成功地改进这些技术难点将有利于DDDAS在科学研究和生产管理中更广泛的应用,并会对科学研究、生产管理与社会生活产生重要影响<sup>[2]</sup>。

## 参考文献

- [1] Ouyang Y., Zhang J. E., Luo S. M. Dynamic Data Driven Application System: Recent Development and Future Perspective[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 204:1-8
- [2] National Science Foundation. Dynamic data driven application systems [EB/OL]// 2000 NSF Workshop Report. [http://www.nsf.gov/cise/cns/dddas/dd\\_das\\_work\\_shop\\_rprt.doc](http://www.nsf.gov/cise/cns/dddas/dd_das_work_shop_rprt.doc)
- [3] Darema F. Dynamic data driven applications systems: New capabilities for application simulations and measurements[J]. *Lecture Notes In Computer Science*, 2005, 3515:610-615
- [4] National Science Foundation. DDDAS: Dynamic data driven applications systems, application examples [EB/OL]. [http://www.nsf.gov/cise/cns/dddas/DDDAS\\_Appendix.jsp](http://www.nsf.gov/cise/cns/dddas/DDDAS_Appendix.jsp), 2006
- [5] Douglas C. C., Shannon C. E., Efendiev Y., et al. A note on data-driven contaminant simulation [J]. *Lecture Notes In Computer Science*, 2004, 3038:701-708
- [6] Douglas C. C., Efendiev Y. A dynamic data-driven application simulation framework for contaminant transport problems [J]. *Computers Math. Appl.*, 2006, 51: 1633-1646
- [7] Mandel J., Bennethum L. S., Chen M. S. Towards a dynamic data driven application system for wildfire simulation [J]. *Lecture Notes In Computer Science*, 2005, 3515: 632-639
- [8] Gaylor M., Seltzer M., Moulton S., et al. A dynamic, data-driven, decision support system for emergency medical services [J]. *Lecture Notes In Computer Science*, 2005, 3515: 703-711
- [9] Douglas C. C., Darema F. DDDAS—Dynamic Data-Driven Application Systems [EB/OL]. <http://www.dddas.org>, 2007
- [10] CDC (Center for Disease Control). About harmful algal

- blooms[EB/OL]. <http://www.cdc.gov/hab/factsheet.pdf>, 2005
- [11] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Intergovernmental panel on climate change technical summary of the 3rd assessment report of working group 1[R]. Geneva; IPCC, 2001
- [12] Malla G. , Bhatia A. , Pathak H. , *et al.* Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors[J]. *Chemosphere*, 2005, 58:141-147
- [13] Grosso S. J. D. , Parton W. J. , Mosier A. R. , *et al.* DAYCENT national-scale simulations of nitrous oxide emissions from cropped soils in the United States[J]. *J. Environ. Qual.* , 2006, 35:1451-1460
- [14] Parton W. J. , Hartman M. D. , Ojima D. S. , *et al.* DYC-CENT: its land surface submodel-description and testing [J]. *Glob. Planet. Change*, 1998, 19:35-48
- [15] 免费论文网. 西北地区的农业灌溉与节水途径[EB/OL]. <http://www.66wen.com/06gx/shuili/shuiwen/20060818/33397.html>, 2006
- [16] Teixeira J. L. , Pereira L. S. ISAREG: An irrigation scheduling simulation model[J]. *ICID Bull.* , 1992, 41: 29-48
- [17] 刘钰, Fernando R. M. , Pereir L. S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. *水利学报*, 1999 (6):45-50
- [18] Oweis T. , Rodrigues P. N. , Pereira L. S. Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Nera East to cope with water scarcity[M]//Rossi G. , Cancelliere A. , Pereira L. S. , *et al.* Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Dordrecht: Kluwer, 2003: 259-272
- [19] Zairi A. , Amami E. L. , Slatni H. , *et al.* Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia[M]// Rossi G. , Cancelliere A. , Pereira L. S. , *et al.* Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Dordrecht: Kluwer, 2003: 181-201
- [20] Wohl E. , Angermeier P. L. , Bledsoe B. , *et al.* River restoration [J]. *Water Resource Research*, 2005, 41:W10301
- [21] US - EPA. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources, BASINS, Version 3. 1. User's Manual[R]. Washington DC:, Office of Water, US - EPA, 2004, EPA-823-C-04-004
- [22] DHI (Danish Hydraulic Institute). MIKE SHE, Integrated surface and groundwater [EB/OL]. <http://www.dhisoftware.com/mikeshe/>, 2005