

文章编号: 1004-4574(2008)01-0109-06

# 中国北方气候变化对小麦产量的影响 ——基于 EPIC 模型的模拟研究

王志强<sup>2</sup>, 方伟华<sup>1,2,3</sup>, 何 飞<sup>2</sup>, 徐 宏<sup>2</sup>

(1 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 2 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3 民政部 教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

**摘要:** 中国的粮食产量在过去的几十年中一直保持着稳定的增长, 农业技术在其中起到了重要的作用。但随着全球气候变暖及其导致的气候极端事件的增加, 气候变化对作物生长和产量造成了不同的影响。选用美国农业部提出的 EPIC( Environmental Policy Integrated Climate) 农作物生长模型评价了气候变化对小麦产量的影响。基于 EPIC 模型, 模拟了中国北方 80 个典型站点的春小麦和冬小麦 1961-2005 年期间的生长过程, 分析了不同作物类型、不同灌溉类型和不同农业区域小麦产量的波动, 以及生长季辐射、水分胁迫因子和温度胁迫因子对产量波动的影响。结果表明: 在不考虑农业技术因素的情况下, 辐射的波动是导致小麦产量波动的主要原因; 温度胁迫的降低在一定程度上促进了小麦的增产。

**关键词:** 气候变化; EPIC 模型; 小麦产量; 中国北方

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3      **文献标识码:** A

## Effect of climate change on wheat yield in northern China a research based on EPIC model

WANG Zh+qiang<sup>2</sup>, FANG We+hua<sup>1,2,3</sup>, HE Fei<sup>2</sup>, XU Hong<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875 China 2 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster Ministry of Education of China Beijing Normal University, Beijing 100875, China 3 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, the People's Republic of China Beijing 100875 China)

**Abstract** The grain yield in China has maintained a stable increase in past some decades and in which agricultural technologies played an important role. A global climate warming and the increase of the extreme climate event, climate change may impose positive or negative effect on the crop growth and yield. In this paper, the Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) crop growth model is proposed for assessing the effect of climate change on wheat yield. The EPIC model was developed by USDA to analyze the relationship between soil erosion and agricultural productivity at station yield. This study, under the non-change condition of the agricultural management modelled the wheat growth (1961-2005) of both irrigated and rain-fed spring and winter wheat at 80 typical sites located in four agro-regions of North China by EPIC model, and analyzed the influence of the changes of radiation, water stress, and temperature stress on wheat yields in north China. The result shows that the variety of the solar radiation

收稿日期: 2007-11-20    修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家重点基础研究计划(2006CB400505); 国家自然科学基金资助项目(40601002)

作者简介: 王志强(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事气候变化与自然灾害研究。

通讯作者: 方伟华, 男, 副教授. E-mail: fang@ires.cn

was a main factor of the fluctuation of wheat yield the temperature stress likely causes the increase of productivity of the irrigated winter wheat in the North China Plain The water stress influences the rain-fed wheat in the arid and semi-arid area

**Keywords** climate change EPIC model wheat yield northern China

中国的粮食安全一直都是中国乃至世界关心的热点。过去的几十年中,中国的粮食产量一直保持着稳定的增长。农业技术的提高在粮食产量增长中扮演着最重要的角色,但气候变化也可以对作物生长和产量产生有利或不利的影 响。在第四次 IPCC 研究报告中指出<sup>[1]</sup>: 1905-2005年,全球地表温度上升了 0.74℃,气候系统变暖已经毋庸置疑。在这样的背景下,年际间的气候波动越来越大,气候极端事件也可能增多,诸如干旱洪水。众多学者对中国北方气候变化的研究表明:过去 20~50a 中国北方大多数地区温度一直呈持续上升趋势,尤其是最近的 10a 从空间上看,西北部分地区有一定的转湿趋势,但整个中国北方仍表现为一个干旱化的趋势,同时范围有向南和向东扩展的趋势<sup>[2]</sup>。中国整体的总太阳辐射变化出现了 1960到 1990年减少,1990年以后增加的趋势<sup>[3]</sup>。因此,正确理解气候变化趋势对作物产量的影响,制订较好的适应性对策有着重要的意义。

EPIC (environmental policy integrated climate) 模型是一个地块尺度上的作物模型,能够在多种气候情景、环境状况和管理制度下,以日为步长,模拟上百年的作物生长过程和作物产量。EPIC 模型由美国农业部自 20世纪 80年代提出以来,经过不断的发展完善,已经得到很好的应用。该模型是一个土壤-作物-大气-管理结合的系统,主要包括天气、水文、侵蚀、养分、作物、土壤温度、耕作、作物环境控制和经济几个模块<sup>[4-5]</sup>。运用 EPIC 模型模拟作物生长和产量,已经在很多国家得到了广泛地应用,并且精度也比较高<sup>[6-7]</sup>。

本文选择了中国北方地区 80个站点,运用 EPIC 农作物生长模型模拟 1961-2005年冬小麦和春小麦的产量,分析了辐射、水分胁迫和温度胁迫对冬小麦和春小麦产量的影响,可以为探寻农作物适应气候变化造成的影响提供参考依据。

# 1 研究区与数据

## 1.1 研究区

本文选择了中国北方东北区 (NE),华北区 (NP),西北区 (NW)和新疆 (XJ)四个主要农业区的 80个站点作为研究区 (图 1)。根据农业气象站的数据将每个站点的作物类型划分为春小麦 (S 三角形)和冬小麦

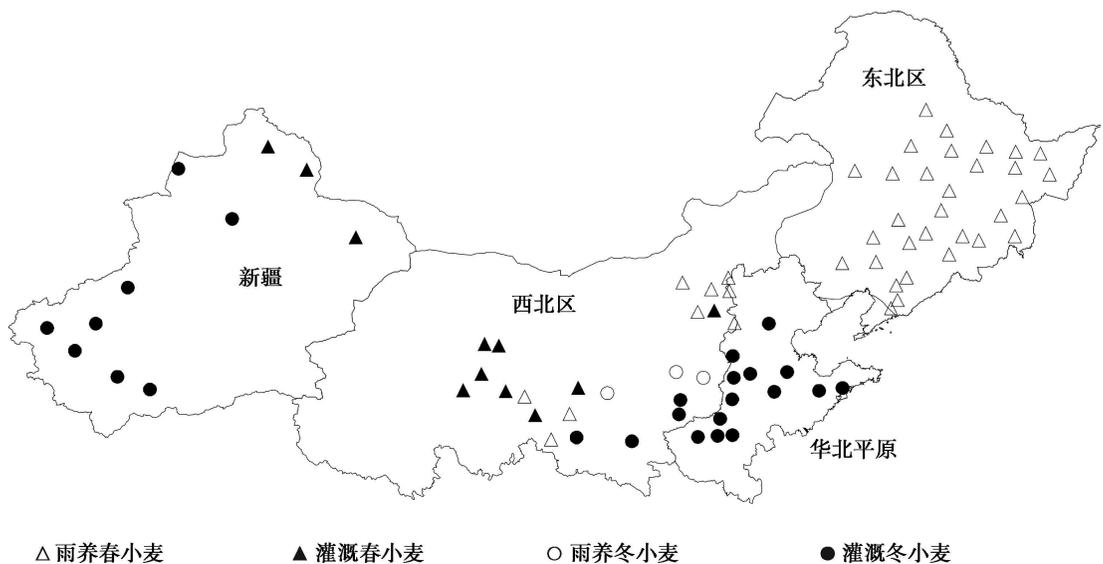


图 1 中国北方雨养和灌溉春小麦与冬小麦站点分布图

Fig 1 Map of rain-fed and irrigated spring and winter wheat sites in northern China

(W, 圆形)两种类型。每个站点的灌溉方式又划分为灌溉农业(I, 实心符号)和雨养农业(R, 空心符号)两种类型。因此, 本文根据农业区、小麦类型和灌溉类型将研究区的站点划分为8种组合类型: NE-S-R(32站), NPW-I(14站), NW-S-I(8站), NW-S-R(8站), NW-W-I(4站), NW-W-R(3站), XJS-I(3站), and XJW-I(8站)。

## 1.2 数据

本文所输入的数据包括两个方面: (1)模型的相关参数, 包括作物参数、耕作参数、施肥参数等; (2)基本输入数据, 包括日气象数据、天气生成器数据、土壤数据、田间管理数据等。气象数据来源于中国国家气象局提供的站点数据, 包括1961–2005年的日最高气温、日最低气温、日降水量、日太阳总辐射、日相对湿度和日平均风速。天气生成器数据是从1961–2005年站点日数据计算得到的, 包括日最高气温的月均值、日最低气温的月均值、日最高气温的月标准偏差、日最低气温的月标准偏差、月平均降水量、日平均降水量的月标准偏差、日平均降水量的月偏斜系数、晴天之后出现雨天的概率、雨天之后出现雨天的概率、月平均降雨天数、月最大半小时降雨量、月平均太阳辐射、月平均相对湿度。土壤数据来源于中国1:100万土壤类型图和中国土种志提供的土壤剖面数据<sup>[8]</sup>, 其中土壤理化属性包括: 土层数、土层厚度、土壤容重、萎蔫系数、田间持水能力、机械组成、PH值、有机碳、盐基饱和度、碳酸钙含量、阳离子交换能力、饱和传导率、有机质等20多个参数。田间管理数据主要包括作物播种和收获日期、作物PHU、施肥、灌溉等数据。作物播种和收获日期参照国家农业气象站提供的1996年的数据<sup>[9]</sup>。冬小麦和春小麦的作物遗传参数以模型默认参数为准, 而冬小麦和春小麦的潜在热量单位(PHU)分别选择2000度和1700度<sup>[10]</sup>。施肥量数据来源于1996年中国农业数据库, 主要包括氮肥、钾肥、磷肥和复合肥。灌溉方式根据雨养农业和灌溉农业均采用自动灌溉。

## 2 方法和验证

### 2.1 方法

本文选择EPIC模型中的EPIC5300版本进行模拟研究。小麦产量的模拟可以分为以下几个步骤: (1)计算每天的潜在生物量, 其主要是由辐射、温度和相对湿度来决定; (2)计算每天的各种胁迫因子, 主要包括水分胁迫、温度胁迫、养分胁迫和通气性胁迫; (3)计算收获指数, 其主要是由作物每天生长的最大胁迫因子来决定; (4)综合计算作物生长期内的潜在生物量和收获因子确定最终的产量<sup>[11]</sup>。

作物产量是收获指数,  $I_H$  和地上生物量  $B_{AG}$  的函数(式(1))。作物产量的变化主要是受辐射(式(2)和式(3))、水分胁迫因子(式(4))和温度胁迫因子(式(5))的影响, 其关系分别为:

$$Y_{LDj} = I_{Hj} B_{AGj} \quad (1)$$

式中,  $Y_{LD}$  是作物经济产量,  $I_H$  是作物收获因子,  $B_{AG}$  是地上生物量。

$$\Delta B_{pi} = 0.001 E_{Bj} R_{PAi} \quad (2)$$

式中,  $B$  是日潜在增长的生物量,  $E_B$  是能量转化为生物量的作物参数。

$$R_{PAi} = 0.5 R_{Ai} [1 - \exp(-0.65 I_{LAi})] \quad (3)$$

式中,  $R_{PA}$  是截获光合作用有效辐射量,  $R_A$  是太阳辐射,  $I_{LA}$  是叶面积指数。

$$S_{wi} = \sum_{l=1}^M u_{il} / E_{pi} \quad (4)$$

式中,  $S_w$  是水分胁迫因子,  $u$  是第  $l$  层的水分利用率,  $E_{pi}$  是第  $i$  天的潜在作物水分利用率。

$$S_T = \sin \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{T_{Gi} - T_{bj}}{T_{oi} - T_{bj}} \right) \right], 0 \leq S_T \leq 1 \quad (5)$$

式中,  $S_T$  是作物温度胁迫因子,  $T_G$  是日平均地表温度,  $T_i$  是作物的基点温度,  $T_0$  是作物的最适温度。

本文的主要目标是模拟气候对小麦产量的影响研究。因此, 本研究的前提假设是: 根据现有数据的情况, 假定养分和通气性胁迫因子在不同年份之间保持不变; 对于一个特定的站点而言, 小麦类型、施肥方式、耕作方式、灌溉方式在整个模拟过程中也保持不变; 土壤数据也保持不变; 在模拟的整个过程中, 只有气象输入数据是一个变化的量。基于以上假设, 本文将1961–2005年80个站点的日气象数据输入EPIC模型, 对中国北方春小麦和冬小麦的生长过程进行了模拟。

### 2 2 验证

本文根据 1996 年统计产量数据和模型模拟的产量数据进行验证(图 2), 相关系数为 0.775。模拟产量与统计产量之间出现偏差的原因有很多, 主要有数据本身的误差, 不正确的数据输入, 不合理的作物参数等。在本研究中, 由于模型的作物参数没有根据不同站点的情况进行本地化, 而且田间管理的准确数据获得很困难, 因此模拟产量与实测产量还是有一定的偏差。如果这些数据的精度有所提高, 模型的模拟精度将会有较大的改善。就本研究而言, 这样的模拟精度在一定程度上还是比较满意的。

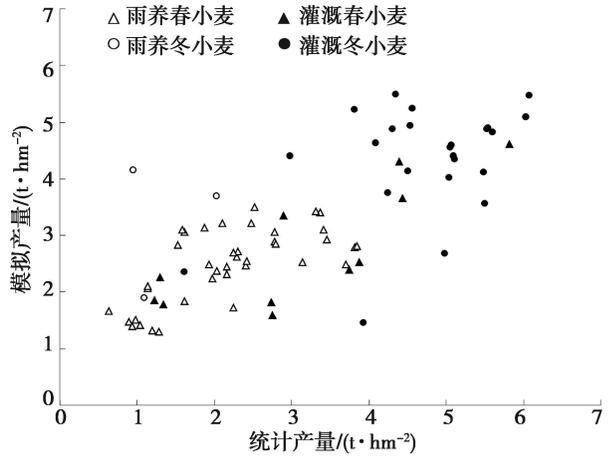


图 2 80 个站点的模拟产量与统计产量的散点图 (1996)  
Fig 2 Divergence point diagram between simulated and statistic yields for 80 sites(1996)

## 3 结果分析

对中国北方 80 个站点过去 45a 小麦产量的模拟

结果显示: 大多数站点的产量呈现显著地下降趋势, 其中有 60% 的站点在 20 世纪 80 年代出现了一定的转折上升。图 3 给出了每一种组合区域的年均产量变化, NE-S-R, NW-S-I, NW-S-R, NW-W-R and XJ-W-I 这 5 种组合区域的小麦产量在过去 45a 呈现波动中下降的趋势; NW-W-I 和 XJ-S-I 两种组合区域的小麦产量波动变化不大; 只有 NP-W-I 类型区的小麦出现上升态势。

图 4 给出了每一种组合区域的每年生长季辐射平均值、水分胁迫因子和温度胁迫因子平均值变化。生长季水分胁迫因子和总太阳辐射的变化从 1961 到 2005 年一直呈下降的趋势, 尤其是 NP-W-I 和 NW-S-I 两个组合区域下降趋势非常显著。对于 XJ-S-I 类型, 温度和水分胁迫有一定的增加趋势, 而其他 7 种类型的变化趋势都不明显。除了 NW-S-R 类型, 温度胁迫在其他类型中都是主要的胁迫因子。

对比图 3 和图 4 在太阳辐射和产量波动之间有一定的正相关关系。这也说明辐射的下降是造成小麦产量下降的主要原因。然而, 华北灌溉冬小麦的产量上升可能与温度胁迫的快速降低有一定的关系。

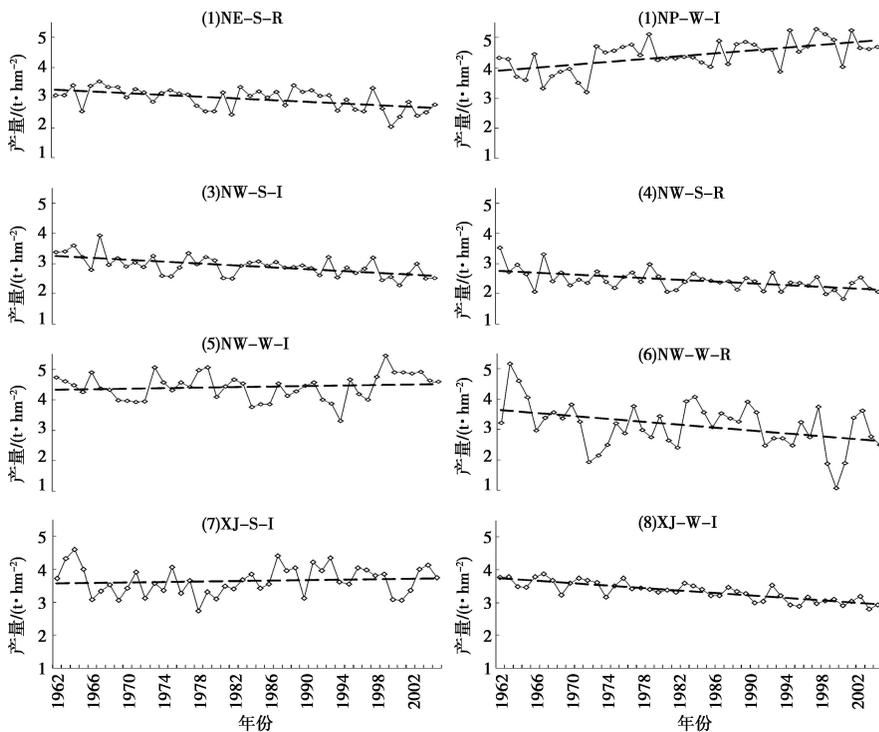


图 3 8 个类型区的小麦模拟产量变化趋势图

Fig 3 Change trend of simulated annual wheat yield in 8 kinds of region

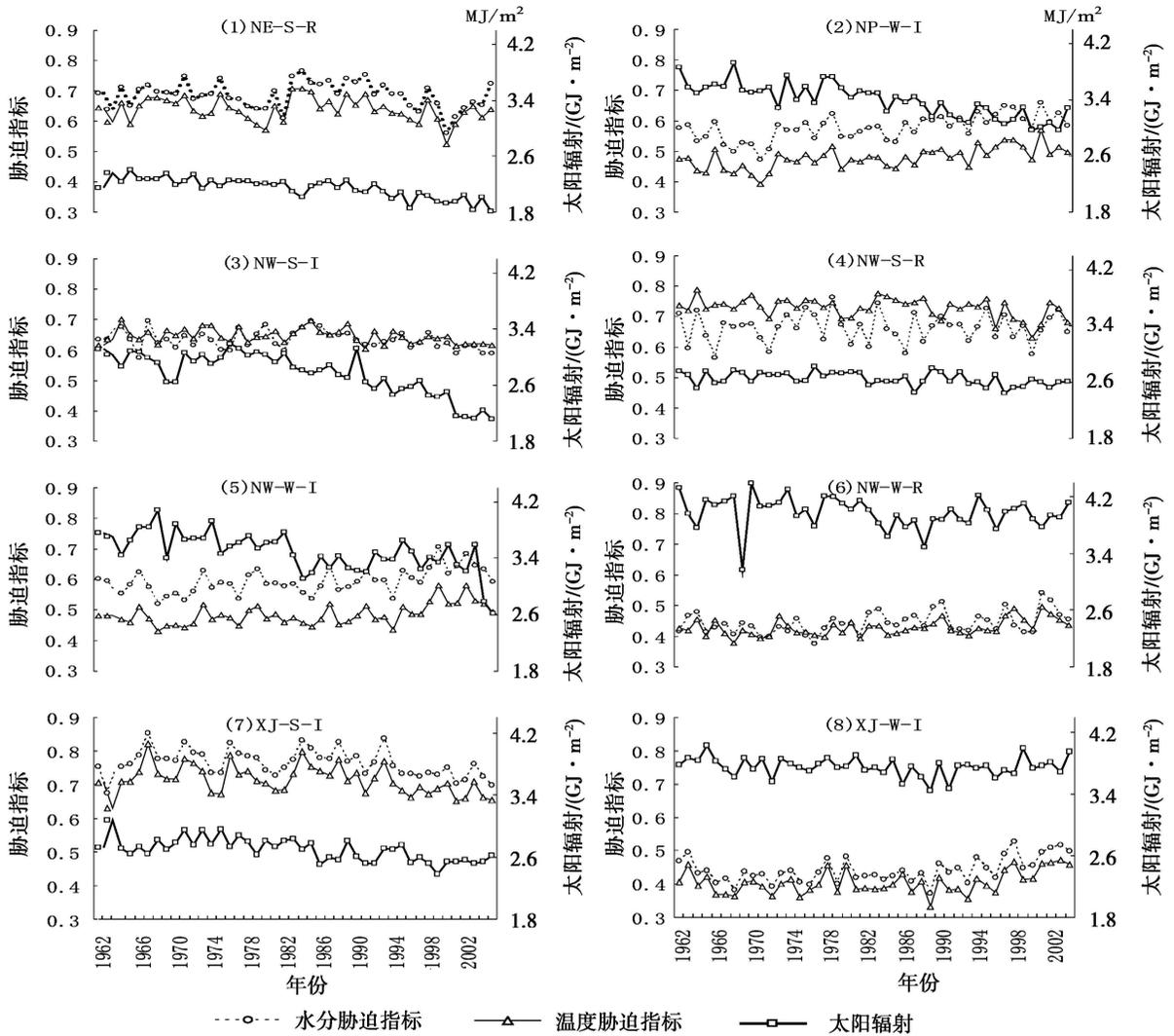


图 4 8 个类型区的生长季太阳辐射、水分和温度胁迫变化趋势图

Fig 4 Change trend of annual solar radiation, water and temperature stress indices in growing season in 8 kinds of region

## 4 结论与讨论

尽管农业技术在粮食增产中起着重要的作用,但随着全球气候变暖及其可能导致的气候极端事件的增多,气候变化对作物生长和产量将产生较大的影响。本文基于 EPIC 模型,模拟了 1961–2005 年中国北方 80 个站点的春小麦和冬小麦产量,并分析了气候变化和产量之间的关系。结果表明:太阳辐射变化是造成小麦产量波动的主要原因;温度胁迫因子的显著减弱可能是华北平原灌溉冬小麦产量增加的原因;水分胁迫对于干旱和半干旱地区雨养小麦的产量影响比较大。

尽管 EPIC 模型能够模拟小麦生长过程和评价小麦产量和气候变化的关系,但在本研究中仍然存在很多的不确定性。(1)模型输入数据的不确定性。由于实际田间观测数据的缺乏,田间管理数据主要是从中国统计年鉴上获取,数据的可靠性存在一定地不确定性。(2)模型校验的不确定性。由于实际产量数据的缺乏,本研究采用 1996 年县级统计产量数据为校验数据,存在一定的不确定性。如果模型采用物候数据进行补充校验,可能会改善模型的模拟精度。

结合 GIS 技术,空间 EPIC 模型可以在地区和国家尺度上模拟作物产量和作物生长过程,因此,如何利用空间数据进行空间尺度上的模拟将是下一步研究的方向之一。另外,利用 EPIC 模型,分析在未来气候情景下,气候变化对作物生长的影响也是一个重要的研究方向。

## 参考文献:

- [ 1 ] IPCC. Summary for Policy makers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [ 2 ] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 陈明林. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. 大气科学, 2005, 29(5): 671-681.
- [ 3 ] 陈志华. 1957-2000年中国地面太阳辐射状况的研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [ 4 ] Philip W G, Williams J R. Historical development and applications of the EPIC and APEX Models [R]. 2005, Working Paper 05-WP 397.
- [ 5 ] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, Spalton D A. The EPIC Crop Growth Model [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 489-511.
- [ 6 ] Caballero M, Jones C A, Marty J R, et al. Calibration and validation of EPIC for crop rotations in southern France [J]. Agricultural Systems, 1990, 33(2): 153-171.
- [ 7 ] Stockle C O, Williams J R, Rosenberg N J, et al. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops. Part I: Modification of the EPIC model for climate change analysis [J]. Agricultural Systems, 1992, 38(3): 225-238.
- [ 8 ] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [ 9 ] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993.
- [ 10 ] 王荣栋, 尹经章. 作物栽培学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [ 11 ] Singh V P. Computer models of watershed hydrology [M/CD]. Highlands Ranch, Colo: Water Resources Publications, 2002.