

基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究

李 艳^{1,3}, 薛昌颖², 杨晓光¹*, 王 靖¹, 刘 园¹, Enli Wang⁴

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 3. 北京华风气象影视信息集团有限责任公司, 北京 100081; 4. 澳大利亚联邦科工组织土地与水研究所, 澳大利亚堪培拉, GPO Box 1666)

摘要: 华北平原是我国冬小麦主产区, 干旱是影响该地区冬小麦产量稳定的最主要的灾害之一。进行产量风险评估以及如何通过灌溉降低干旱产量风险对于该地区冬小麦稳产高产具有重要的现实意义。该文利用澳大利亚的 APSIM 农业生产系统模拟模型, 以华北平原北京和山东禹城为例, 分析了不同降水年型条件下冬小麦的产量风险; 通过不同灌溉方案的设计和模拟, 分析了不同的灌溉方案在各种年型条件下对降低冬小麦产量风险的作用。结果表明: 北京和禹城地区冬小麦生育期内绝大部分年份降水不能满足作物的需水, 严重缺水年型出现的频率均在 30% 左右, 两地该年型的平均产量仅为 2 445 和 2 466 kg/hm², 产量风险较高。灌溉对于降低产量风险具有明显的作用, 但需根据不同的缺水年型选择适宜的灌溉方案。在兼顾冬小麦稳产高产和提高水分利用效率的前提下, 严重和中度缺水年型进行 3 次补充灌溉, 分别为底墒水、拔节水和开花水, 而在轻度缺水年型条件下, 底墒水和拔节水两次灌溉即可大大降低干旱带来的产量风险, 灌水定额为 50~70 mm, 且随缺水程度的降低和灌溉次数的增加, 可以适当减小灌水定额。

关键词: 作物, 灌溉, 风险分析, 模型, APSIM, 冬小麦

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.10.007

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-10-0035-10

李 艳, 薛昌颖, 杨晓光, 等. 基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 35—44.

Li Yan, Xue Changying, Yang Xiaoguang, et al. Reduction of yield risk of winter wheat by appropriate irrigation based on APSIM model[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 35—44.(in Chinese with English abstract)

0 引言

华北平原是中国冬小麦主产区, 小麦产量占全国总产量的近 50%, 该区域冬小麦产量的高低对全国粮食安全具有举足轻重的影响。由于受季风气候的影响, 华北平原降水量年际变化大, 年内季节分配不均, 冬小麦生长季干旱频发^[1]。据资料统计, 仅河南省平均每年受旱面积就达 96.06 万 hm², 占河南耕地面积的 15%, 其中受旱比较严重的年份达 461.89 万 hm², 占全省耕地面积的 70%^[2]。而且干旱常出现在冬小麦需水关键期, 特别是 4、5 月份, 缺水量占全生育期的 2/3 左右^[3]。可见, 干旱是影响该地区冬小麦产量稳定和提高的主要农业气象灾害, 频发的干旱更是增大了冬小麦的减产风险。

因此, 如何降低华北平原因干旱缺水造成的冬小麦产量风险成为政府和学术界关注的问题。近年来, 随着人们对灾害风险意识的提高, 国内外学者从灾害风险、

作物产量风险以及灾害造成的产量灾损等各个角度对灾害风险进行了大量的研究, 特别是针对冬小麦干旱进行了研究^[4-7], 为农业部门制定适宜的防灾减灾政策、决策和措施提供了科学的依据。但以往的研究多以资料统计方法为主, 通过对长期历史资料的分析, 建立各因子间统计关系和评估模型, 评估不同灾害程度的风险水平及灾损风险水平。随着作物生长模拟模型应用的逐渐成熟, 国内很多学者开始尝试将其应用于灾害风险评估领域, 其中包括 PS123 模型、WheatSM 模型、WOFOST 模型^[8-10]等作物生长模拟模型。但针对各种降水年型条件下, 不同灌溉方案对干旱条件下稳产增产的贡献研究还少见报导。

本文在已有研究基础上, 利用 APSIM 作物生长模拟模型, 对不同的灌溉方案下冬小麦产量风险进行分析, 研究不同的灌溉方案对降低冬小麦产量风险的作用, 从而提出华北平原适宜的冬小麦灌溉管理方案, 为该地区冬小麦合理的灌溉和产量风险管理提供科学参考。APSIM 模型除在产量变化和经济风险评估方面具有与其他作物模型相同的功能外, 在模拟作物轮作, 植物蒸腾、地表蒸发等水分关系, 以及土壤生产能力的变化趋势等方面也具有强大的功能^[11]。目前, APSIM 模型在我国的适应性和应用研究尚处于探索阶段。王琳和李艳等利用北京和禹城的冬小麦田间试验数据对 APSIM 模型在华北平原的适应性进行了检验, 表明该模型在模拟作物生物量和土壤水分方面具有较好的准确性, 初步验证了该模型在北京和禹城两地应用的可行性^[11-12]。

收稿时间: 2009-04-20 修订时间: 2009-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2009CB118608); 公益性行业(农业)科研专项项目(200803028); 农业部 948 项目(2006-G52A-Q08)部分研究内容

作者简介: 李 艳(1981—), 女, 湖北人, 从事农业气候资源利用与农业系统模拟方面研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: liyan19810915@126.com

*通信作者: 杨晓光, 女, 博士, 中国农业大学资源与环境学院教授, 博士生导师, 主要从事农业气候资源利用领域研究。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: yangxg@cau.edu.cn

1 材料和方法

1.1 APSIM-Wheat 模型简介

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) 是由澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (Agricultural Production Systems Research Unit, 简称 APSRU) 开发研制的农业生产系统模拟模型^[13]。它可以使作物生长、牧草生产、残留物降解、土壤水分和营养及土壤侵蚀组合起来模拟不同生产系统, 以及模拟土壤和作物管理。该模型通过设计“插一拔”式结构构建高度独立的作物生长、土壤水分和土壤氮素模块, 方便进行轮作、间作等种植方式和各种管理措施的模拟^[14]。APSIM—Wheat (4.0 版本) 模型包括小麦生长 (Wheat)、土壤水分 (Soilwat2)、土壤肥力 (Soiln2)、作物残余物 (Residue) 和管理 (Manage) 模块。该模型可以动态地模拟小麦地下和地上部的生长、土壤水分和土壤氮素情况。

模型运行主要需要气象数据 (逐日最高、最低气温、降水量、总辐射等)、土壤数据 (试验点的土壤类型、质地、典型土壤的分层饱和含水率、田间持水率、凋萎系数、容重、土壤有机质含量、全氮、pH 值和土壤碳氮比等)、栽培数据 (品种类型、播期、播量、播深等)、田

间管理措施数据以及试验点的经纬度和海拔高度等。用户可以根据研究需要, 在模型中设置输出变量, 如产量、各生育期起止日期 (包括播种—出苗, 出苗—拔节, 拔节—开花, 开花—灌浆, 灌浆—成熟)、全生育期及各个生育阶段的降水量、需水量和蒸散量等。

1.2 研究点气候概况

本文的研究地点为北京 (北纬 39°48', 东经 116°28') 和山东禹城 (北纬 36°57', 东经 116°36')。图 1 为北京和山东禹城 1961—2000 年冬小麦生长季内气候条件, 包括总辐射、≥0℃ 积温以及降水量。北京和禹城两地冬小麦生长季内 3 个主要的气象因子中年际变异最大的均为降水量, 其次是总辐射量, 积温的变异系数最小。北京地区冬小麦生长季内降水量最大的年份为 1979 年, 达到 300 mm, 降水量最小的年份为 1996 年, 降水量仅有 31 mm, 两者相差 269 mm; 禹城地区冬小麦生长季内降水量最大的年份为 1963 年, 达到 411 mm, 降水量最小的年份为 1996 年, 降水量仅有 61 mm, 两者相差 350 mm。两试验地点降水量、总辐射和积温的 40 a 平均值分别为 131 和 172 mm、2970 和 2661 MJ/m²、2119 和 2289 °C·d; 3 个要素的变异系数分别为 46.8% 和 39.8%、4.7% 和 6.3%、2.7% 和 7.2%。

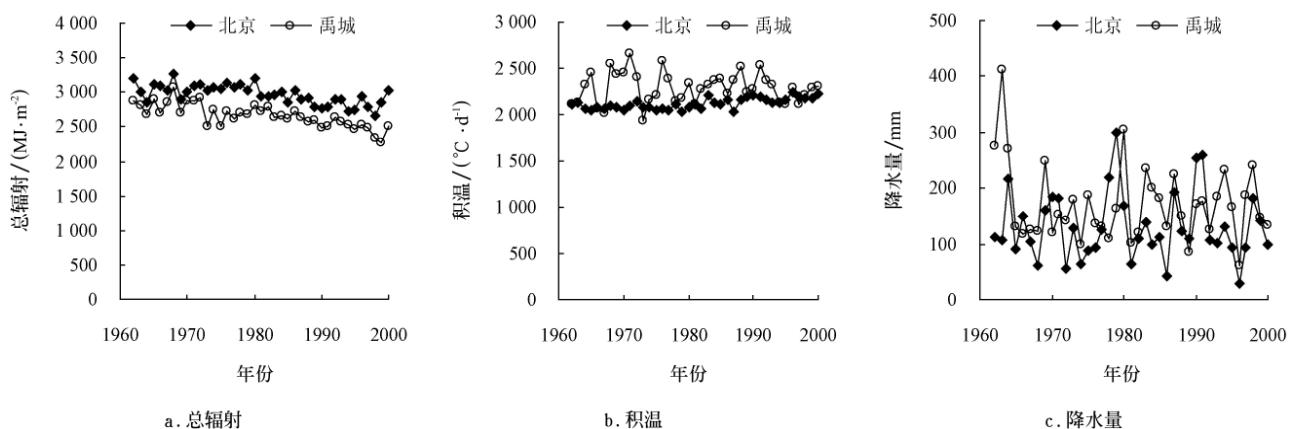


图 1 1961—2000 年北京和禹城冬小麦生长季内的积温、总辐射和降水量

Fig.1 Accumulated temperature, radiation and rainfall in winter wheat growth duration in Beijing and Yucheng from 1961 to 2000

1.3 资料来源

用于模型模拟的土壤参数主要包括北京和禹城两点的土壤类型、质地以及土壤分层田间持水率、饱和含水率、凋萎系数、容重、有机质含量和土壤碳氮比, 这些数据来源于 2004—2005 年北京地区东北旺冬小麦水肥耦合试验和 1998—2001 年山东禹城生态试验站冬小麦田间试验中的测定结果。

冬小麦品种为北京和禹城当地的主要冬小麦品种, 分别为京 411 和科禹 13。模型所需输入的作物参数来自模型参数调试和验证的研究结果, 见参考文献[12]。

北京和禹城近 40 a (1961—2000 年) 的逐日气象数据, 包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、2 m 处风速、饱和水汽压、实际水汽压; 多年平均气象数据, 包括多年平均气温、多年平均气温年较差。

这些数据取自本研究组的“农业气候信息系统”、禹城生态实验站。

模型输入的日总辐射采用彭曼—蒙特斯方法 (公式 (1)) 由日照时数换算得出。

$$R_{ns} = 0.77(0.25 + 0.5 \times nN^{-1}) \times R_a \quad (1)$$

式中: R_{ns} —— 日总辐射, MJ/(m²·d); R_a —— 日晴空太阳总辐射, MJ/(m²·d); n —— 日照时数, h; N —— 可照时数, h。

1.4 研究方法

1.4.1 APSIM 模型适应性验证

作者利用山东禹城综合农业试验站 1998—1999 年、2000—2001 年田间试验以及北京东北旺 2004—2005 年水肥耦合试验数据, 基于 APSIM 模型对冬小麦生长动态、叶面积指数和产量进行模拟和调参, 获取模型所需的作

物参数, 检验了模型对北京和禹城冬小麦生长模拟的适应性。模型调试和验证结果表明: 禹城 2000—2001 年冬小麦地上部总生物量和叶面积指数的归一化均方根误差分别为 32% 和 36%, 禹城 1998—1999 年冬小麦地上部总生物量和叶面积指数的归一化均方根误差分别为 23% 和 57%; 北京 2004—2005 年试验冬小麦地上部总生物量的归一化均方根误差分别为 18% 和 15%; 北京 2004—2005 年试验冬小麦叶面积指数的归一化均方根误差分别为 28% 和 51%; 模型对禹城和北京冬小麦产量的归一化均方根误差为 21%。APSIM 模型能够反映不同的水肥处理对冬小麦生长和产量的影响, 模型的模拟结果与田间实测结果达到了较好的吻合度, 表明 APSIM 在北京和山东禹城具有较好的适应性。有关模型验证的部分内容已经发表, 详见参考文献[12]。

1.4.2 光温生产潜力计算方法

冬小麦的光温生产潜力一方面可直接利用模型模拟, 也可利用光温生产潜力公式计算得到。通过对比两种方法得出的光温生产潜力结果并查阅相关文献, 表明模型模拟得出的光温生产潜力偏低, 而用公式计算得到的光温生产潜力与已有的研究结果更加吻合, 故本文采用公式计算的光温生产潜力结果。现将公式简单介绍如下:

1) 光合生产潜力模式

光合生产潜力是指在集约农业中, 生产条件(水、肥、劳力、技术)得到充分保证, 生态因子适宜(温度适宜、CO₂供应充足, 没有不利因素)时, 理想的作物群体(密度、结构、株型合理)中, 单位面积上实际获取的太阳辐射量所能形成的最高产量。本文利用辐射、温度及叶面积动态模式求算冬小麦的光合生产潜力(Y)^[15]

$$Y = \sum_{i=1}^n K \cdot e_i \cdot q_i \quad (2)$$

式中: K ——能量转换系数; e_i ——各生育时段的光能利用率, %; q_i ——生育时段的辐射量, kJ/cm²。

$$e_i = E \cdot \frac{L_i}{L} \cdot \frac{t_i}{T} \quad (3)$$

式中: E ——生育期的理论最大光能利用率(取 6%); L_i ——各生育时段的实际叶面积系数; t_i ——各生育时段的变换后的评价温度(℃), 其目的是使在最适温度条件下, 其温度订正值为 1, 其它温度条件下, 温度订正值小于 1; L ——理想群体的最大叶面积, 冬小麦 $L=6$; T ——最适温度, 冬小麦 $T=20^\circ\text{C}$ 。

$$t_i = \begin{cases} 0 & t'_i \leq T_1 \text{ 或 } t'_i \geq T_2 \\ t'_i & T_1 < t'_i < T \\ T - (t'_i - T) = 2T - t'_i & T < t'_i < T_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: t'_i ——各生育时段的实际平均温度, ℃; T_1 ——光合作用下限温度, 冬小麦 $T_1=0^\circ\text{C}$; T_2 ——光合作用上限温度, 冬小麦 $T_2=30^\circ\text{C}$;

$$Y = \frac{K \cdot E}{LT} \sum_{i=1}^n q_i \cdot L_i \cdot t_i \quad (5)$$

对冬小麦叶面积指数的订正, 我们采用下列叶面积动态模式^[16]

冬前:

$$L_i = -0.2624 + 0.9911 \times D_{\text{DVS1}} \quad (6)$$

返青—抽穗:

$$L_i = 0.6906 + 8.0645 \times D_{\text{DVS2}} \quad D_{\text{DVS2}} \leq 0.8 \quad (7)$$

抽穗—成熟:

$$L_i = 9.893 - 8.65 \times D_{\text{DVS2}} \quad D_{\text{DVS2}} > 0.8 \quad (8)$$

式中 D_{DVS1} 、 D_{DVS2} ——分别为冬前、返青后冬小麦所处发育阶段实际积温与所需积温的比值。

2) 光温生产潜力模式

光温生产潜力是指在农业生产条件充分保证及充足的 CO₂ 和水分供应条件下, 理想群体在当地光、温条件下, 所能达到的最高产量, 可作为有灌溉条件下的产量上限。其计算模式为

$$Y_2 = Y_1 \times F(t) \quad (9)$$

式中 $F(t)$ ——作物光合作用的温度订正函数, 本文采用分式法进行计算温度订正函数^[16]。

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < 3^\circ\text{C} \\ t/20 & 3^\circ\text{C} \leq t < 20^\circ\text{C} \\ 1 & t = 20^\circ\text{C} \\ 1 - (t - 20)/20 & t > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

1.4.3 雨养产量模拟方法

雨养产量即为在无任何补充灌溉, 完全依靠自然降水条件下获得的冬小麦产量。本文所用的雨养产量均为 APSIM 模型的模拟结果。将通过调试和验证获得的北京和禹城两个冬小麦品种的作物参数以及各地的土壤参数输入模型, 并输入 1961—2000 年北京和禹城逐日的气象资料, 设置固定的田间管理措施, 如播期、播量、播深以及施肥时间和方式, 运行模型, 输出逐年的冬小麦雨养产量模拟结果。

1.4.4 冬小麦全生育期年型划分

根据冬小麦生育期水分亏缺率的距平百分率将 1961—2000 年划分为 3 种年型: 轻度缺水年、中度缺水年和严重缺水年。水分亏缺率的距平百分率根据以下公式计算

$$a_i = \frac{R_i - \bar{R}}{\bar{R}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: a_i ——第 i 年份冬小麦生育期缺水率距平百分率, %; R_i ——第 i 年份冬小麦生育期的水分亏缺率, %; \bar{R} ——1961—2000 年冬小麦生育期水分亏缺率的平均值, %。

将 $a_i \geq 20\%$ 的年份定为严重缺水年, $-20\% < a_i < 20\%$ 为中度缺水年, $a_i \leq -20\%$ 的年份为轻度缺水年。

冬小麦全生育期水分亏缺率(R_i)根据以下公式计算

$$R_i = \frac{ET_m - ET_a}{ET_m} \times 100\% \quad (12)$$

式中: ET_m ——模型模拟的潜在条件下冬小麦全生育期潜在蒸散量, mm, 即为当年冬小麦生长季需水量; ET_a ——模型模拟的雨养条件下冬小麦全生育期实际蒸散量, mm。

1.4.5 灌溉方案设计

依据实际生产管理情况, 本文在模拟不同灌溉方案对降低冬小麦产量风险时设计了4种灌溉处理: ①底墒水+拔节水; ②底墒水+拔节水+开花水; ③底墒水+拔节水+灌浆水; ④底墒水+拔节水+开花水+灌浆水。每个灌溉处理下设置了2种灌溉定额, 分别为50 mm和70 mm。

1.4.6 产量风险计算方法

本文风险率是基于保证率进行计算的, 公式如下^[15]

$$p = m / M \times 100\% \quad (13)$$

$$r = 100 - p \quad (14)$$

式中: p ——保证率, %; m ——满足某一要素指标的年份数; M ——进行要素分析计算的总年份; r ——风险率, %。

2 结果与分析

2.1 北京和禹城冬小麦产量潜力和雨养产量分析

图2为APSIM模型模拟的北京和禹城1961—2000年冬小麦的光温生产潜力和雨养条件下的产量。从图2中可见, 北京冬小麦产量潜力变化范围为8 340~

10 348 kg/hm², 多年平均值为9 364 kg/hm², 变异系数为5%。禹城冬小麦产量潜力变化范围为7 423~8 931 kg/hm², 多年平均值为8 273 kg/hm², 相应的变异系数为4.7%。产量潜力在9 000 kg/hm²以上的年份北京有31 a, 占79.5%, 而禹城却没有年份达到9 000 kg/hm²; 在8 000~9 000 kg/hm²之间的年份北京有8 a, 占20.5%, 禹城有29 a, 占74.4%; 在7 000~8 000 kg/hm²之间的年份禹城有10 a, 占25.6%, 北京没有出现产量低于8 000 kg/hm²的年份。可见, 北京与禹城两地相比, 由于北京地区冬小麦生长季辐射量较高, 另一方面温度较低造成生育期较长, 因此北京地区冬小麦具有较高的产量潜力水平。

雨养条件下, 由于降水年际变异大, 雨养产量的波动较大(图2a)。北京地区雨养产量变化在1 184~5 817 kg/hm², 变异系数为34.1%; 禹城地区雨养产量变化在1 756~7 244 kg/hm², 变异系数为35.6%。北京和禹城多年平均的雨养产量分别为3 633 kg/hm²和4 068 kg/hm²。

比较雨养产量和潜在产量可以发现, 在模拟的40 a中, 雨养产量达到产量潜力的70%以上的年份禹城只有7 a, 占所有年份的17.9%, 而北京所有年份的雨养产量均在产量潜力70%以下; 达到50%~70%水平之间的北京地区有10 a, 占所有年份的25.6%, 禹城的有11 a, 占所有年份的28.2%。北京和禹城分别有74.4%和46.1%的年份雨养产量均在50%产量潜力水平以下。因此, 通过灌溉北京和禹城两地冬小麦均有较高的产量潜力可供挖掘。

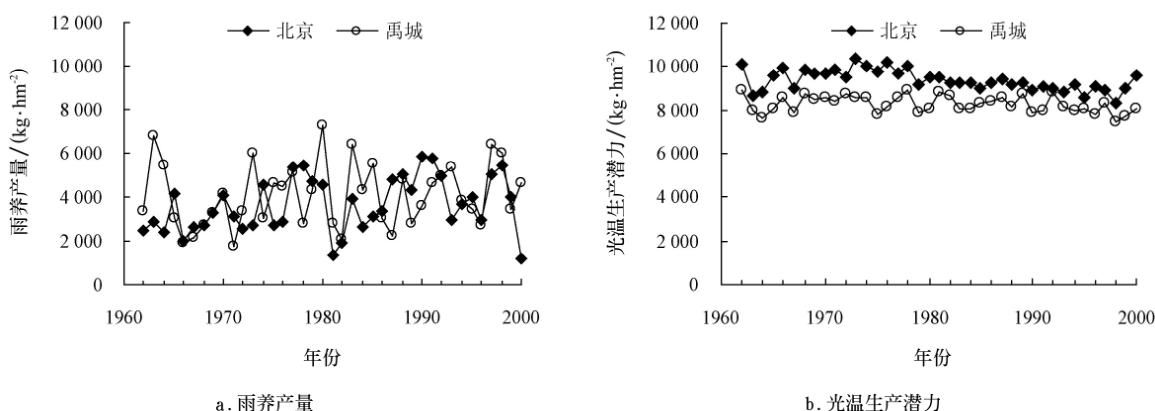


图2 1961—2000年北京和禹城冬小麦雨养条件下的产量和光温生产潜力

Fig.2 Rain fed yields and potential yields of winter wheat in Beijing and Yucheng from 1961 to 2000

2.2 北京和禹城冬小麦雨养条件下产量风险分析

2.2.1 年型划分

冬小麦全生育期水分亏缺程度可以反映出其减产情况。图3为全生育期水分亏缺率距平百分率与产量距平百分率的线性相关图。可以看出, 北京和禹城冬小麦全生育期水分亏缺率与产量之间具有很好的线性相关关系, 水分亏缺率越大, 减产幅度则越大。

根据水分亏缺距平百分率与模拟雨养产量距平百分

率的相关关系, 本文选取全生育期水分亏缺率的距平百分率, 划分全生育期缺水年型, 划分结果见表1。根据划分结果, 北京和禹城严重缺水年型中, 全生育期水分亏缺率分别达到57.6%和44.8%, 出现频率分别为26%和33%。轻度缺水年中, 全生育期水分亏缺率分别低于38.4%和29.9%。在3种年型中, 中度缺水年出现的频率最高, 北京和禹城两地分别为46%和39%。

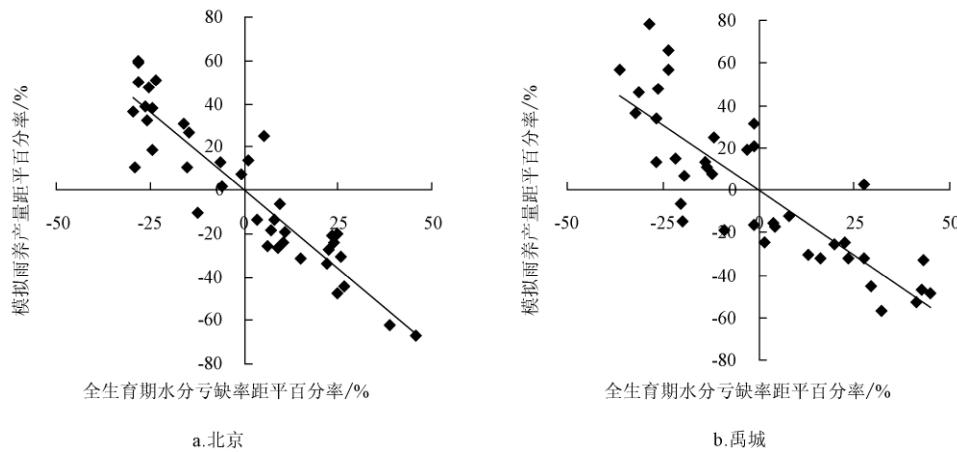


图3 北京和禹城冬小麦全生育期自然水分亏缺率距平百分率与模拟产量距平百分率的相关关系

Fig.3 Relationship between anomaly percentage of water shortage rate for whole growing period of winter wheat and that of simulated yield of winter wheat in Beijing and Yucheng

表1 北京和禹城冬小麦全生育期缺水年型

Table 1 Types of water shortage year for whole growing period of winter wheat in Beijing and Yucheng

年型	北京			禹城		
	距平百分率/%	对应的全生育期水分亏缺率/%	年型出现频率/%	距平百分率/%	对应的全生育期水分亏缺率/%	年型出现频率/%
严重缺水年	>20	>57.6	26	>20	>44.8	33
中度缺水年	-20~20	38.4~57.6	46	-20~20	29.9~44.8	39
轻度缺水年	<-20	<38.4	28	<-20	<29.9	28

2.2.2 不同缺水年型的冬小麦产量风险

北京和禹城全生育期严重、中度和轻度缺水年型条件下的冬小麦产量风险率分别见图4、图5和图6。不同的年型条件下，冬小麦产量风险率差别较大，以产量水平3 000 kg/hm²为例：

北京地区气候背景下，严重缺水年型风险率为100%，即严重缺水年型下产量均在3 000 kg/hm²以下；中度缺水年型的风险率与严重缺水年相比显著降低，为31.6%，即中度缺水年型下达到3 000 kg/hm²产量的风险为31.6%；轻度缺水年型条件下的风险率为0，即该年型条件下产量均在3 000 kg/hm²以上。禹城地区气候背景下，严重缺水年型风险率为80%；中度缺水年型风险率为20%，轻度缺水年型风险率为0。

同样都在50%风险率水平下，北京地区3种年型条件下产量水平分别为2 445、3 401和5 041 kg/hm²；禹城地区3种年型条件下的产量分别为2 466、3 574和5 957 kg/hm²。

2.3 北京和禹城灌溉降低冬小麦干旱减产风险分析

从以上干旱风险的分析可知，在雨养的条件下，北京和禹城冬小麦的产量风险较大，因此实际生产中要获得稳产、高产，必须保证有一定的灌溉水补充。本文利用APSIM-wheat模型模拟了北京和禹城不同灌溉定额和灌溉处理下冬小麦的产量，对雨养和灌溉后的不同缺水年型下冬小麦的产量风险进行了比较，分析灌溉对降低冬小麦干旱减产风险水平的作用，为有灌溉条件的地区提供科学的灌溉依据。

2.3.1 严重缺水年型

图4为北京和禹城严重缺水年型中不同灌溉处理(不同灌溉时期和不同灌溉定额)后的产量风险与雨养条件下的风险水平比较。经灌溉后，北京和禹城两地区严重缺水年型中的产量风险水平与雨养条件下相比均有显著降低，以4 000 kg/hm²产量水平为例进行对比分析：北京地区雨养条件下4 000 kg/hm²产量水平的风险率为100%，当灌溉定额为70 mm时，处理①的风险率降至40%，其他3个处理的风险率均降至20%左右；当灌溉定额为50 mm时，处理①的风险率降至70%，其他3个处理的风险率降至20%~30%之间。禹城地区雨养条件下4 000 kg/hm²产量水平的风险率为90%，略低于北京地区，当灌溉定额为70 mm时，处理①的风险率已降至10%左右，其他3个处理的风险率均已降为0；当灌溉定额为50 mm时，处理①的风险率降低至55%左右，其他3个处理的风险率也均已降为0。

从不同处理风险率分布图中可以看出，不同灌溉处理对降低产量风险的作用存在一定的差异。北京和禹城两个地区处理①降低风险的作用最小，其他3个处理降低产量风险的作用均显著高于处理①，但处理②和处理③两个处理对降低风险的作用差异较小，处理④降低产量风险的程度最高，除北京地区灌溉定额为70 mm情况外，在高产量水平时其作用明显高于处理②和处理③。在严重缺水年型条件下，灌溉定额为50 mm时处理①、处理②和处理③降低产量风险的程度均显著低于灌溉定额为70 mm，但在处理④中两个灌溉定额之间无显著的

差异。

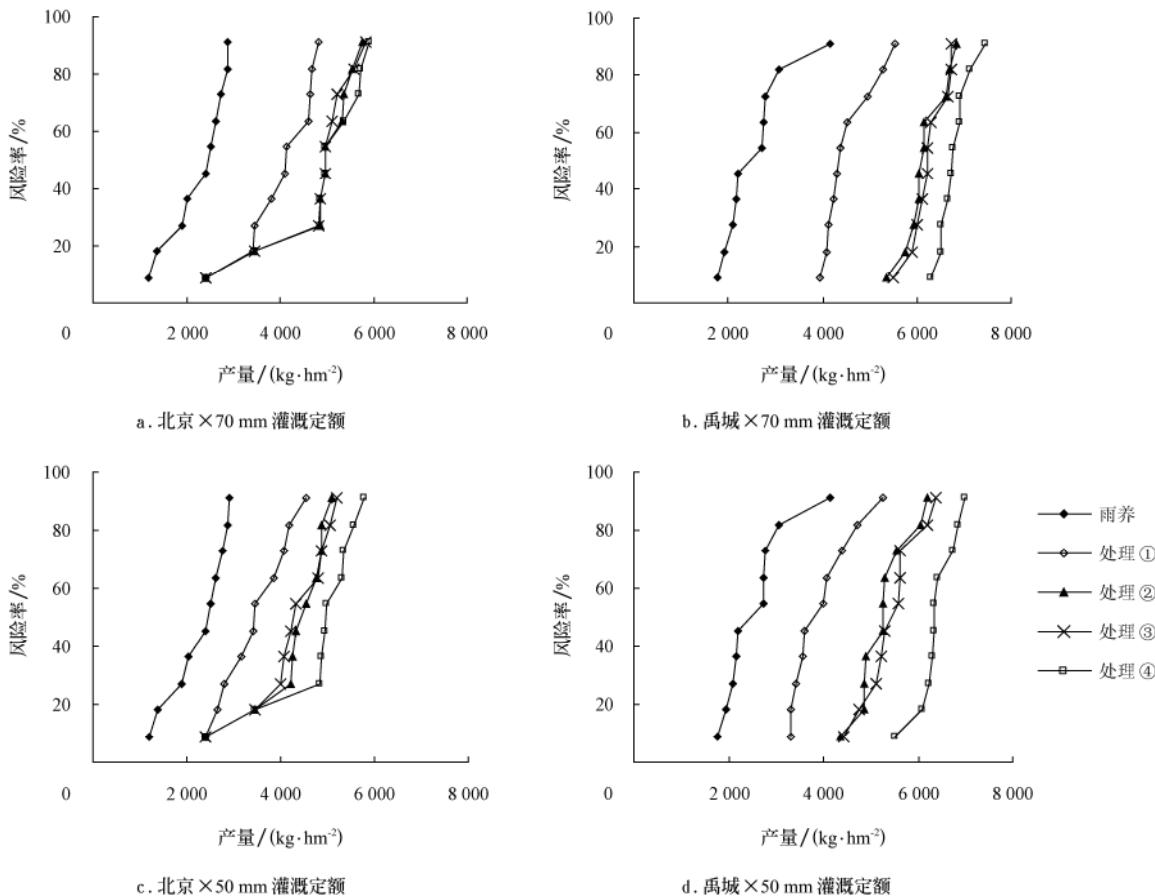


图 4 严重缺水年型不同灌溉处理后产量风险与雨养条件下产量风险比较

Fig.4 Comparison of yield risk between different irrigation treatments and rain fed condition in serious drought years

2.3.2 中度缺水年型

图 5 为北京和禹城中度缺水年型中不同灌溉处理后的产量风险与雨养条件下的风险水平比较。经灌溉后, 北京和禹城两地区中度缺水年型中的产量风险水平与雨养条件下相比均有显著降低, 以 $5000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平为例进行对比分析: 北京地区雨养条件下 $5000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险率为 100%, 当灌溉定额为 70 mm 时, 处理①的风险率降至 65%, 其他 3 个处理的风险率均降至 35%~40% 之间; 当灌溉定额为 50 mm 时, 处理①的风险率降至 80%, 其他 3 个处理的风险率同样也降至 35%~40% 之间。禹城地区雨养条件下 $5000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险率为 85%, 略低于北京地区, 当灌溉定额为 70 mm 时, 处理①的风险率已降至 35% 左右, 其他 3 个处理的风险率均已降至 5%; 当灌溉定额为 50 mm 时, 处理①的风险率降低至 44% 左右, 其他 3 个处理的风险率降至 5%~10%。

风险率分布图显示出在中度缺水年型条件下, 不同灌溉处理对降低风险的作用同样也存在一定的差异, 但与严重缺水年型条件相比, 各处理间的差异明显缩小, 其变化规律与严重缺水年型相似, 即处理①降低风险的作用最小, 其他 3 个处理降低产量风险的作用均高于处理①, 处理②和处理③对降低风险的作用接近, 处理④降低产量风险的程度最高, 但与处理②和处理③之间的差异不大。在中度缺水年型条件下, 灌溉定额为 50 mm

时各处理降低产量风险的程度均低于灌溉定额为 70 mm 时。

2.3.3 轻度缺水年型

图 6 为北京和禹城轻度缺水年型中不同灌溉处理后的产量风险与雨养条件下的风险水平比较。经灌溉后, 北京和禹城两地区轻度缺水年型中的产量风险水平与雨养条件下相比均有显著降低, 以 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平为例进行对比分析: 北京地区雨养条件下 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险率为 100%, 当灌溉定额为 70 mm 时, 处理①的风险率降至 43%, 其他 3 个处理的风险率均降至 25% 左右; 当灌溉定额为 50 mm 时, 处理①的风险率降至 60%, 其他 3 个处理的风险率同样也降至 25% 之间。禹城地区雨养条件下 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险率为 60%, 低于北京地区, 当灌溉定额为 70 mm 时, 处理①的风险率已降至 42% 左右, 其他 3 个处理的风险率均已降至 25% 以下; 当灌溉定额为 50 mm 时, 处理①的风险率降低至 45% 左右, 其他 3 个处理的风险率降至 25% 以下。

轻度缺水年型条件下, 不同灌溉处理降低风险的差异与严重缺水年型和中度缺水年型条件相比已经明显缩小, 特别是在处理②、处理③和处理④之间, 3 个处理对降低风险的作用非常接近。灌溉定额由 70 mm 降为 50 mm 时, 各处理降低风险的程度也有所降低, 但差异很小。

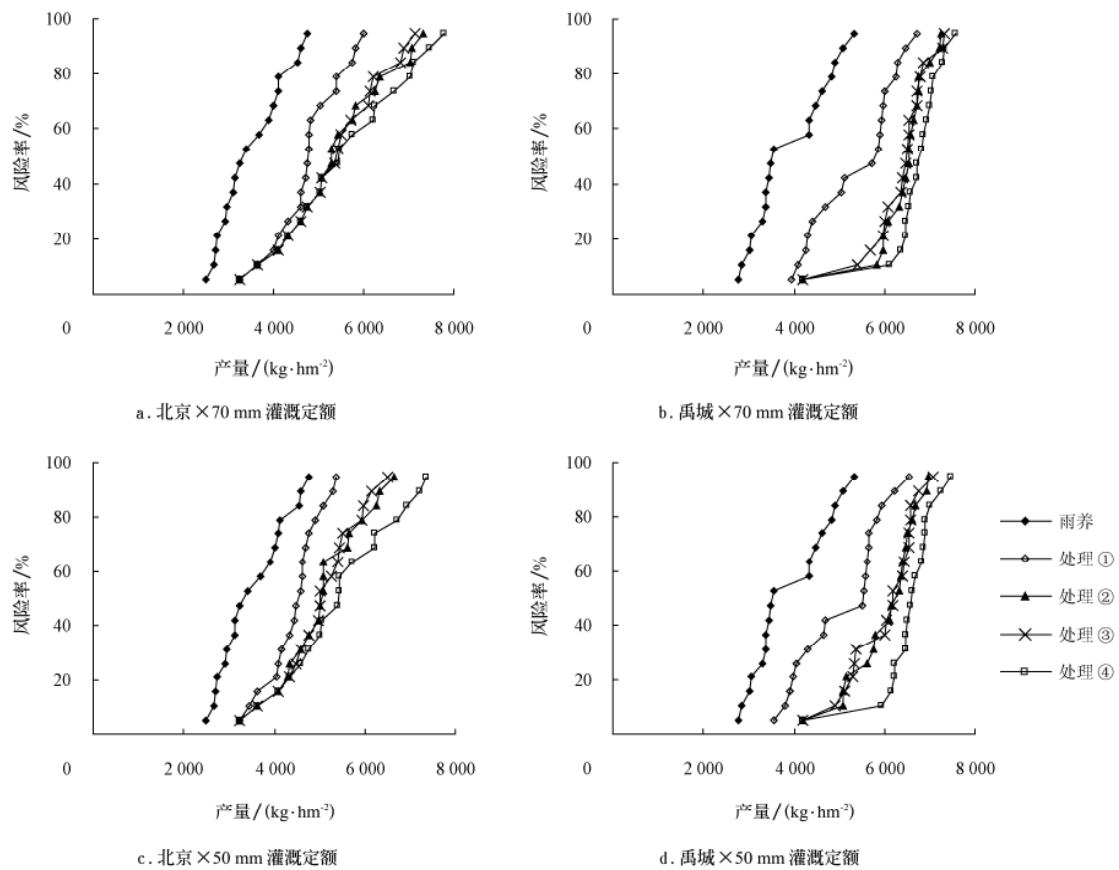


图 5 中度缺水年型不同灌溉处理后产量风险与雨养条件下产量风险比较

Fig.5 Comparison of yield risk between different irrigation treatments and rain fed condition in medium drought years

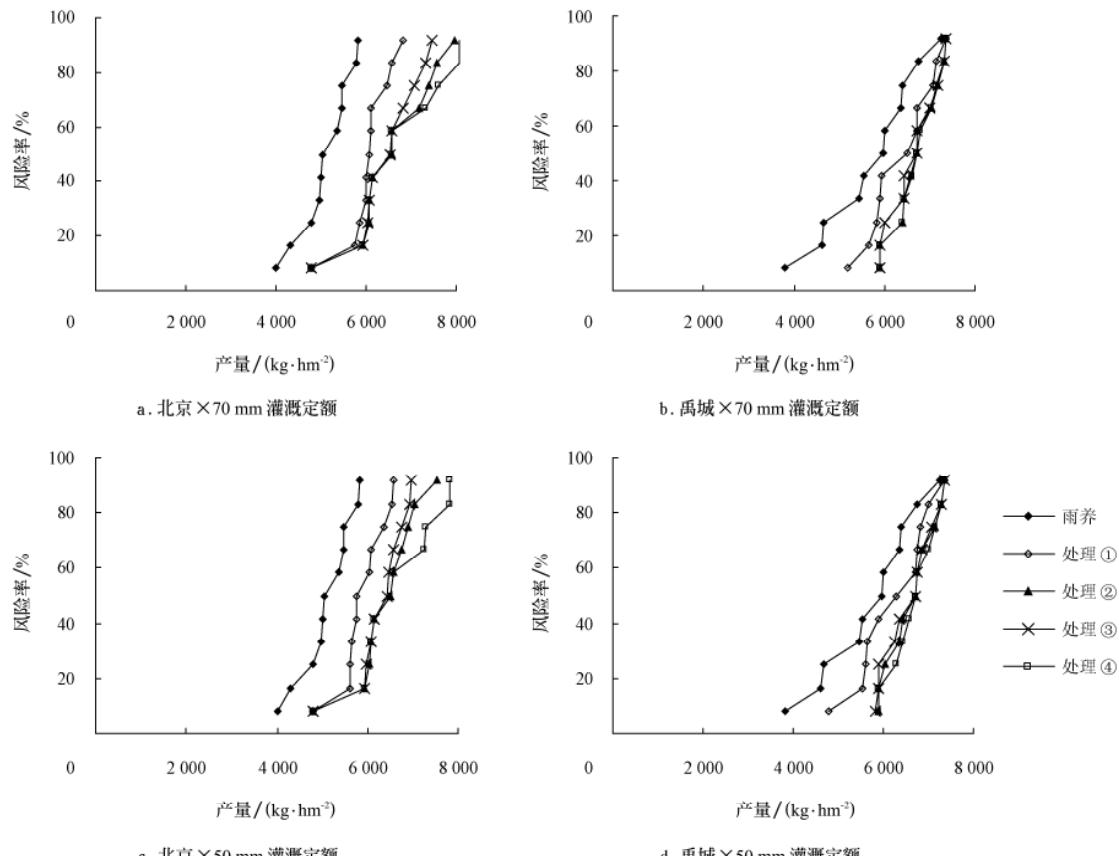


图 6 轻度缺水年型不同灌溉处理后产量风险与雨养条件下产量风险比较

Fig.6 Comparison of yield risk between different irrigation treatments and rain fed condition in light drought years

在华北冬麦区，为保证出苗质量和安全越冬，基本上都会浇足底墒水和越冬水，能够保证冬前小麦生长的水分需求。而春季是水分供需矛盾最为突出的时期，此时小麦处于拔节-开花期，缺水对小麦产量影响最为严重，其次是灌浆期。从各灌溉处理后小麦产量风险水平的分布与雨养产量风险水平的对比可以看出，雨养条件与灌溉处理①之间产量风险降低的幅度最大，特别是在严重缺水年型中，说明拔节水对降低产量风险水平是最为关键的。处理②和③的产量风险水平基本一致，表明开花水和灌浆水对降低产量风险的作用基本相同。由处理①变化到处理②和③产量风险降低的幅度已经远低于从雨养条件到处理①时降低的幅度，同样处理④条件下相同的灌溉量对于降低产量风险的作用已大大降低。

因此，在华北冬麦区，降低因干旱缺水造成的产量风险的关键是首先保证拔节水，中度和严重缺水年型需要在开花或者灌浆期再补灌一次，开花和灌浆期同时灌溉在严重缺水年型对降低产量风险仍有一定的作用，但水分利用效率较低。

3 结 论

本文以华北地区北京和禹城两个点为例，选取全生育期自然水分亏缺率距平百分率划分冬小麦全生育期缺水年型，利用APSIM模型分析各种了不同年型下的产量风险，并根据实际生产情况设计了8种灌溉方案，分析了灌溉对降低冬小麦产量风险的作用，结果表明：

1) 受降水年际波动的影响，北京和禹城两个地区雨养条件下冬小麦产量风险较高。根据全生育期水分亏缺率划分结果，两地严重缺水年型出现的频率均在30%左右，该年型条件下的平均产量仅为 $2\ 445\text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $2\ 466\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

2) 灌溉对降低冬小麦产量风险具有显著的作用。经不同的灌溉处理后，北京和禹城严重缺水年型条件下 $4\ 000\text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险由雨养条件下的90%~100%降至20%~40%；中度缺水年型 $5\ 000\text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险由雨养条件下的85%~100%降至35%~65%；轻度缺水年型条件下 $6\ 000\text{ kg}/\text{hm}^2$ 产量水平的风险由雨养条件下的90%~100%降至25%~43%。

3) 不同年型条件下，各灌溉处理对降低风险的作用不同。在严重和中度缺水年型条件下，北京和禹城两地区均以处理④即灌4水(底墒水+拔节水+开花水+灌浆水)对降低产量风险的作用最大，但与处理②(底墒水+拔节水+开花水)和处理③(底墒水+拔节水+灌浆水)比较接近，其水分利用效率较低；轻度缺水年型条件下，4个处理对降低风险的作用均很接近。因此，实际生产中在兼顾冬小麦稳产高产和充分利用灌溉水的情况下，严重和中度缺水年型应选择灌3水的方案，而在轻度缺水年型条件下，灌2水的方案即可大大降低产量风险。

4) 降低灌溉定额在一定程度上削弱了灌溉对降低风险的作用，但随着灌溉次数的增多，这种削弱作用逐渐降低。在灌溉次数较多的处理(处理④)中以及轻度缺水年型条件下，50 mm灌溉定额对降低风险的作用与灌

溉定额为70 mm时无显著的差异。

4 讨 论

本文在利用作物生长模拟模型的基础上，以产量风险为目标，评估了不同的灌溉方案对降低冬小麦产量风险的作用，得出不同年型适宜的灌溉方案。薛昌颖等^[17]从生育期水分供需平衡角度，分析了不同的灌溉对降低冬小麦干旱减产的风险水平，得出一般在轻旱年可灌1~2水，中旱年可灌2~3水，较重干旱年份3次灌溉，基本都能满足冬小麦需水要求的结论；霍治国等^[1]采用供需率指标，评价了灌溉对降低冬小麦干旱风险的作用，认为北方冬麦区在补充灌溉1~4水后，即可基本满足冬小麦稳产增产的水分需求，且北方冬小麦区适宜补充灌溉3水的区域最大，其次是2水，4水的区域相对较小。可见，本文利用作物生长模型以产量风险为目标得出的结论与已有的结论基本一致，在给出不同年型适宜的灌溉方案(包括灌溉定额和灌溉时期)同时，还给出了可达到的产量水平，对于华北地区冬小麦生产更具有指导意义。

本文仅在有限数据的基础上，针对华北地区两个代表点初步探讨了APSIM-Wheat模型在冬小麦产量风险研究方面的应用。由于APSIM-Wheat模型在华北地区的区域适应性研究目前还处于探索阶段，对模型比较敏感的参数还需进行系统深入的研究，从而提高模型的模拟精度，检验模型的有效性，进一步提高模型在华北地区的区域适应性，使其具有更广阔的应用范围。此外，针对目前灌溉水资源的紧缺性，在灌溉管理方面除考虑产量外，水分的高效利用也是应重点考虑的指标。因此，综合考虑产量的风险水平和水分利用效率评估灌溉方案的适宜性应是今后进一步研究的内容。

志谢：感谢中国科学院地理科学与资源研究所于强研究员和中国农业大学王璞教授为本研究提供基础数据！

[参 考 文 献]

- [1] 霍治国，姜艳. 基于灌溉的北方冬小麦水分供需风险研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 79~84.
Huo Zhiguo, Jiang Yan. Risk analysis of water demand and supply of winter wheat in North China based on irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 79~84. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱自玺，刘荣花，方文松，等. 华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 145~150.
Zhu Zixi, Liu Ronghua, Fang Wensong, et al. Evaluation indices of drought of winter wheat in North China[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 145~150. (in Chinese with English abstract)
- [3] 霍治国，郑江平，徐祥德，等. 华北春旱年型对冬小麦影响的模拟试验[J]. 资源科学, 2000, 22(2): 72~76.
Huo Zhiguo, Zheng Jiangping, Xu Xiangde, et al. Simulation experiment of possible effects of various arid periods in spring on winter wheat in North China[J]. Resource Science,

- 2000, 22(2): 72—76. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邓国, 王昂生, 李世奎, 等. 风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 221—226.
- Deng Guo, Wang Angsheng, Li Shikui, et al. Risk theory and method and its initial application in grain yield[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(3): 221—226. (in Chinese with English abstract)
- [5] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 北方冬小麦产量灾损风险类型的地理分布[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 620—625.
- Xue Changying, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Geographic distribution of winter wheat yield loss risk and its classification in North China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 620—625. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 北方冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 作物学报, 2005, 31(3): 267—274.
- Wang Suyan, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Risk regionalization of winter wheat loss caused by drought in North of China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(3), 267—274. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1068—1072.
- Liu Ronghua, Zhu Zixi, Fang Wensong, et al. Risk regionalization of yield loss caused by drought for winter wheat in North China Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1068—1072. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宇振荣, 张银锁, 马永良. 夏玉米咸水灌溉的风险性及其对策分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 31—35.
- Yu Zhenrong, Zhang Yinsuo, Ma Yongliang. Risk and control measures of soil salinity by using brackish water for maize irrigation[J]. Transactions of the CS AE, 2002, 18(3): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106—110.
- Sun Ning, Feng Liping. Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 106—110. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张雪芬, 余卫东, 王春乙, 等. WOFOST 模型在冬小麦晚霜冻害评估中的应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 337—341.
- Zhang Xuefen, Yu Weidong, Wang Chunyi, et al. Application of WOFOST model to assessment of winter wheat s chilling damage by late frost[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 337—341. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王琳, 郑有飞, 于强, 等. APSIM 模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2480—2486.
- Wang Lin, Zheng Youfei, Yu Qiang, et al. Applicability of Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2480—2486. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李艳, 薛昌颖, 刘园, 等. APSIM 模型对北京和禹城冬小麦生长模拟的适应性研究[J]. 气象, 2008, 34(特刊): 271—279.
- Li Yan, Xue Changying, Liu Yuan, et al. Adatability of APSIM model simulating growth of winter wheat in Beijing and Yucheng[J]. Meteorology, 2008, 34(special issue): 271—279. (in Chinese with English abstract)
- [13] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267—288.
- [14] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255—271.
- [15] 曲曼丽. 农业气候实习指导[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1990: 15—17.
- Qu Manli. Practice guidline of Agro-climate[M]. Beijing: Beijng Agricultural University Press, 1990: 15—17. (in Chinese)
- [16] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 中国北方冬小麦的水分亏缺与气候生产潜力——近 40 年来的动态变化研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 121—130.
- Wang Suyan, HuoZhiguo, Li Shikui et al. Water deficiency and climatic productive potentialities of winter wheat in north of China: study on its dynamic change in recent 40 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 121—130. (in Chinese with English abstract)
- [17] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 131—136.
- Xue Changying, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Action of irrigation on decreasing yield reduction due to drought:a risk assessment of winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 131—136. (in Chinese with English abstract)

Reduction of yield risk of winter wheat by appropriate irrigation based on APSIM model

Li Yan^{1,3}, Xue Changying², Yang Xiaoguang¹✉, Wang Jing¹, Liu Yuan¹, Enli Wang⁴

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003, China;

3. China Meteorological Administration Huafeng Group of Meteorological Audio and Video Information, Beijing 100081, China;

4. CSIRO Land and Water, GPO Box 1666, Clunies Ross ST, Canberra ACT, Australia)

Abstract: The North China Plain (NCP) is the main winter wheat production area in China. However, grain yield of winter wheat is often threatened by drought, leading to a high risk of yield. Assessment on yield risk and study on how to reduce yield risk by appropriate irrigations could provide suitable instructions for irrigation management and increasing yield. By using the simulation model APSIM, taking Beijing and Yucheng as case study areas, yield risk of winter wheat in those two areas were evaluated firstly. Then irrigation schemes were designed and their contributions to reduce yield risk in different rainfall years were analyzed. Results indicated that in most years, rainfall could not meet the requirement of wheat, and in 30% of years water shortage reached serious degree. In serious drought years, yields of winter wheat were only 2 445 and 2 466 kg/hm² in Beijing and Yucheng, respectively. After irrigation, yield risk was reduced greatly, while the appropriate irrigation schemes were varied in different rainfall year types. Synthetically considering reducing yield risk and increasing water use efficiency, three irrigations are appropriate to be given in serious and medium drought years at the stage of before sowing, jointing and flowering. For light drought years, two irrigations at the stage of before sowing and jointing, respectively, are sufficient to reduce yield risk as low as possible.

Key words: crops, irrigation, risk analysis, models, APSIM, winter wheat