

基于作物生长模型的农业干旱 灾害风险动态评估

孙洪泉, 苏志诚, 屈艳萍

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 在阐述干旱灾害风险基本概念的基础上, 分析了农业干旱灾害风险动态评估的难点。通过作物生长模型——DNDC模型模拟作物逐日生长, 得到最终的粮食产量。采用情景分析方法, 对不同气象条件下的作物产量进行估计, 进而计算作物粮食因旱损失, 实现农业干旱灾害风险动态分析。研究选择辽宁省为研究区, 以玉米作物为代表, 空间分析单元为县级行政区, 利用15年的序列数据进行粮食因旱损失评估, 模型模拟辽宁省的总误差控制在15%左右。风险分析结果表明, 辽宁省西北部地区干旱灾害风险高于其他地区, 这也与辽宁省干旱实际情况相吻合。

关键词: 干旱灾害; 风险; 作物生长模型; 农业; 辽宁省

中图分类号: S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)04-0231-06

Dynamic assessment of agricultural drought disasters risk based on crop growth model

SUN Hong-quan, SU Zhi-cheng, QU Yan-ping

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100086, China)

Abstract: This paper reviewed the basic concepts of the drought disaster risk and addressed the difficulties of dynamical assessment of agricultural drought disaster risk. To obtain the final yields of crop, the DNDC model was used to simulate the crop daily growth. The dynamical assessment of agricultural drought disaster risk was derived from the estimation of the crop yields under different weather conditions by using scenario analysis method and the further calculation of the yield losses caused by drought. A 15-years sequence data of maize growth in Liaoning Province, counties as the spatial analysis units, was used in this paper to assess the losses caused by drought. The total error of model simulation was about 16%. The risk analysis results showed that the drought disaster risk in northwest region of Liaoning Province was higher than in other regions, which is consistent with the real drought situation of Liaoning Province.

Keywords: drought disasters; risk; crop growth model; agriculture; Liaoning Province

近年来,我国局部性、区域性干旱灾害频发高发重发,对我国城乡供水安全、粮食安全和生态安全的影响越来越大,灾害管理方式也逐渐由危机管理向风险管理转变。干旱灾害是对农业生产影响最大的自然灾害,如何进行农业干旱灾害风险评估成为研究的热点。但由于干旱的概念模糊,且干旱灾害具有发展缓慢、非结构化等特征,对农业干旱的早期识别、旱情发展监测和灾害损失评估都十分困难^[1]。干旱具有明显的时空分布特性,不同地区的下垫面和环境不同,不同时间发生干旱(如作物生长关键期和非关键期)对农业生产的影响也不同,因此无法采用通用的干旱分析模型进行分析。同时,随着全球

气候变化和人类活动影响的加剧,地表覆盖类型和农业生产方式与格局的变化,增加了农业干旱风险分析的不确定性。因此,农业干旱灾害风险分析具有很大的挑战性。

目前国内外普遍采用的农业旱灾风险分析思路之一是源于灾害风险理论的基本模型,即基于气象、水文等因子分析农业干旱发生频率,建立模型综合评估干旱可能造成的农业损失,在此基础上,建立干旱频率与潜在损失之间的定量关系,从而实现农业干旱灾害风险值的量化^[2]。但由于农业干旱灾害损失与土壤墒情、降水、干旱发生时段、干旱历时、干旱烈度、作物不同生育期的水分敏感性等因素密切相

关,因此难以单纯基于气象、水文指标实现农业干旱事件的概率分析,即无法建立气象干旱、水文干旱事件与农业干旱灾害频率之间的对应关系,也无法直接建立干旱事件概率与其潜在损失的相关关系,所以一直成为农业干旱灾害风险分析的技术难点和瓶颈。

随着研究不断深入,干旱灾害风险分析研究更多地考虑干旱灾害的成因和机理,发展动态的风险分析模型。Kumar^[3]指出作物产量是受干旱胁迫的综合结果,因此可以利用作物产量来衡量风险的高低^[4]。Wilhite^[5]认为受干旱胁迫情况下的粮食产量与正常情况相比的损失程度可以用于衡量干旱大小,这为干旱灾害风险的衡量提供了量化的分析工具。由此,发展提出了基于粮食因旱损失的干旱灾害风险分析模型^[6-7],该模型基于作物产量预测技术,在作物受干旱胁迫条件下,通过对作物生长状态的观测,预测未来粮食最终产量,通过与预期粮食产量的比较来计算粮食因旱损失,划分干旱灾害风险等级,得到干旱灾害风险的动态分析结果。

本研究以辽宁省玉米作物为代表,基于粮食因旱损失的干旱灾害风险分析模型,采用作物生长模型——DNDC模型对作物进行全生育期的模拟,通过预测不同情景模式的粮食产量,计算粮食因旱损失,实现农业干旱灾害风险动态评估。

1 研究区概况及数据基础

1.1 研究区概况

辽宁省地处欧亚大陆东岸、中纬度地区,属于温带大陆性季风气候区。地势大体为北高南低,从陆地向海洋倾斜;山地丘陵分列于东西两侧,向中部平原倾斜。全年平均气温在 7℃~11℃之间,最高气温 30℃,极端最高气温可达 40℃以上,最低气温 -30℃。受季风气候影响,各地差异较大,自西南向东北,自平原向山区递减。年降水量分布不均,东部山地丘陵区达 1 100 mm 以上,西部山地丘陵区只有 400 mm 左右,中部平原降水量比较适中,在 600 mm 左右。农业种植以玉米、水稻为主,其中玉米播种面积占全省农业播种面积的 90%左右,并且绝大部分玉米耕种以雨养为主。

1.2 DNDC 模型简介

DNDC(DeNitrification-DeComposition)模型是美国 New Hampshire 大学发展起来的,目标是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环,时间步长以日(d)为单位,是目前国际上最为成功的模拟生物地球化学循环的模型之一^[8-9]。模型由 6 个子模型构成,分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程,这些过程描述了土壤碳氮

的产生、分解和转化,最后给出作物生物量、土壤有机碳和 CO₂、N₂O 等温室气体通量。模型的输入数据包括逐日气象数据(气温及降水)、土壤性质(容重、质地、初始有机碳含量及酸碱度等)、土地利用(农作物种类和轮作)和农田管理(翻耕、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草)等。

作为作物生长模型,DNDC 模型与 DASSAT^[10]、WOFOST^[11]、EPIC^[1]等类似模型相比的优势是在土壤微生物方面的考虑更为细致全面,这为更准确地预测粮食产量提供了理论依据,这也是选择 DNDC 模型开展本研究的主要原因。

1.3 数据基础

研究的数据基础包含地理、气象、土壤、农业、历史旱灾等。地理数据为辽宁省县级及以上行政区划与概况。气象数据为 1995—2009 年逐日温度数据和降雨数据,其中温度数据有 27 个站点来自气象观测,降雨数据有 820 个站点来自水文观测。土壤数据为县级行政区的土壤类型、田间持水量、有机质含量、容重、pH 值等;农业数据为 1995—2009 年县级行政区的播种面积、播种时间、耕作方式、灌溉面积、种植结构、作物品种、作物总产与单产、受旱面积与因旱减产量等;历史旱灾数据为 1995—2009 年旱灾事件记录和抗旱管理部门的逐旬预报干旱记录等。

2 研究方法

2.1 模型参数率定

在采用 DNDC 模型进行作物逐日生长模拟前,需建立本地化数据库。该数据库包括气候、土壤、作物、人为活动等生态驱动因素,温度、降雨及有关化学物的浓度梯度等环境营力^[4]以及模型的其它内部参数。这些参数有些是有观测值的,有些是需要通过参数率定来确定的(包括无观测值的参数和部分模型内部参数)。本研究通过比对模型模拟的年终产量与实际产量进行参数率定,确定每个模拟单元的未知参数。在参数率定过程中,构造如下代价函数:

$$J(X_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (O_i - P_i(X_j, V))^2 \quad (1)$$

其中, O_i 和 P_i 分别为第 i 年的实际产量和模拟产量; X_j 为第 j 个未知参数; V 为已知参数; n 为模拟的年数; k 为参数个数。通过调整参数 X_j 以最小化代价函数,确定最终的参数集,图 1 为模型参数率定的示意图。

本研究以“区县”为最小模拟单元,并假设该区县的各种内部条件基本均匀,因此可以采用以“点”带“面”的方式,以区县内或临近某一站点的模拟作

为该区县的模拟。由于温度和降水站点不一致,并且雨量站数量多于温度站数量,因此将温度数据空间内插到雨量站上,进行空间一致性处理。研究采用1995—2004年的10 a数据进行参数率定,进而建立每个区县的本地化数据库,并采用2005—2009年的数据进行模型验证。

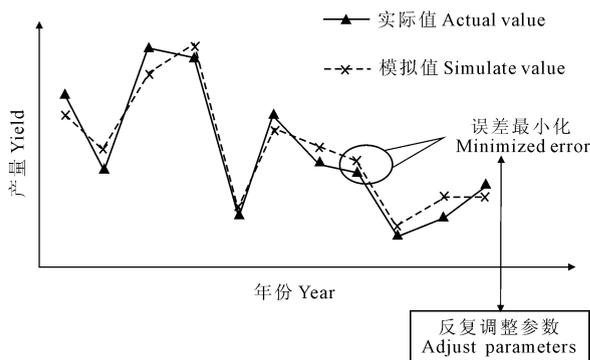


图1 DNDC模型参数率定

Fig.1 Parameters calibration of DNDC model

2.2 粮食因旱损失计算

粮食因旱损失采用如下公式进行计算:

$$L = \begin{cases} \hat{P} - P & \text{if } \hat{P} > P \\ 0 & \text{if } \hat{P} \leq P \end{cases} \quad (2)$$

其中, \hat{P} 为正常粮食产量; P 为受干旱胁迫的粮食产量; L 为粮食因旱损失量。粮食产量 P 既可以是模拟粮食产量也可以是实际粮食产量, 分别通过模型模拟和统计资料获得。正常粮食产量 \hat{P} 是指某地区作物在不受水分、养分、光照等胁迫情况下的自然产量, 该产量不等同于作物品种标定的最高粮食产量(即试验田最高产量)。正常产量是在考虑不同地区的不同土壤和气候条件下的自然最高产量, 即没有干旱胁迫情况下的粮食产量, 而标定产量是最大程度满足作物生长发育所需条件下的粮食产量。如何确定正常粮食产量成为粮食因旱损失计算的关键。

经过调查研究, 辽宁省同一区县内种植的玉米作物品种比较统一, 一般不超过两种, 这为确定以区县为单位的玉米正常产量提供了可行性。本研究根据历年实际粮食产量, 结合品种标定的最高粮食产量, 综合确定该地区的正常粮食产量。具体而言, 在长序列数据中, 最高产量出现的年份通常风调雨顺, 即不存在或存在轻微干旱胁迫, 则实际粮食产量即为作物正常粮食产量的下限, 再参考作物品种标定的最高产量, 结合地区特性, 确定合适的正常产量。

2.3 农业干旱灾害风险动态评估

本研究采用基于粮食因旱损失的风险分析模型, 以“损失”定“风险”。具体是对作物目前或后续

生育阶段的旱情进行评估, 根据当前旱情预测农业最终损失, 进而进行风险量化, 所以是一种动态风险评估。动态风险评估的关键是在作物生长过程中实现最终产量的预测。尽管也有许多统计回归模型能够实现粮食产量的预测, 但是由于粮食最终产量的影响因素众多, 无法建立可靠的统计回归模型。而作物生长模型将外部驱动因素通过模型传导至对最终粮食产量的影响, 实现风险的动态评估。

本研究采用 DNDC 模型对作物生长进行模拟, 基于未来不同气象和水文等条件的假设, 预测不同情景模式下的最终粮食产量, 进行风险量化, 实现动态风险评估。将 DNDC 模型的模拟过程记作函数 $f(\cdot)$, 则农业干旱灾害风险 R 可以表示为关于当前模拟时刻 t 、 t 时刻之前已知的外部条件 W 和 t 时刻之后未知的外部条件 U 的函数, 如下所示:

$$R = f(t, W, U) \quad (3)$$

由于辽宁省的玉米种植以雨养为主, 因此未来外部条件只取决于气象要素, 在 DNDC 模型中主要是温度和降雨。对于干旱而言, 玉米作物的胁迫主要来自水分亏缺, 而高温情况较少发生, 对作物的影响程度也有限。所以, 采用情景分析的方式, 对未来气象条件的假设主要是对降雨量的设定。本研究从抗旱减灾实际需求的角度考虑, 当旱情出现时, 如果未来 N 天无有效降雨, 或不同典型年情况下的干旱灾害风险如何? 是否需要采取抗旱减灾措施? 由此设定了 6 种情景模式, 如表 1 所示。将情景模式记为 s , 则(3)可以写为(4), 即不同情景对应不同的风险。

$$R(s) = f(t, W, U(s)) \quad (4)$$

农业干旱灾害风险评估的技术路线见图 2。具体来讲, 通过 DNDC 模型模拟不同情景模式下的粮食产量, 计算粮食因旱损失, 进行农业旱灾风险等级划分, 进而绘制风险分布图。

3 结果与分析

3.1 模型验证

为了保证模型应用的可靠性, 研究采用 1995—2004 年的 10 a 数据进行参数率定, 并用 2005—2009 年的模拟产量与实际产量对比进行验证。图 3 所示是辽宁省各县(去除无统计的数据)的模拟产量与实际产量的散点图, 其中图 3(a)是 2005—2009 年的验证结果, 图 3(b)是 1995—2009 年的整体模拟情况。从图上可以看出, 整体模拟效果较好, 采用 2005—2009 年的检验数据验证产量预测的标准方差为 $1\ 260\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 1 未来情景模式

Table 1 The modes of scenarios

情景编号 No.	情景模式 Modes	说明 Descriptions
S0	未来 0 天无有效降雨 No effective rain in 0 day	从 t 至作物成熟, 满足作物生长的正常需水。 From day t to crop matured, provide enough water the crop required normally.
S5	未来 5 天无有效降雨 No effective rain in 5 days	从 t 至 $t+5$ 无有效降雨, 从 $t+5$ 至作物成熟, 满足作物生长的正常需水。 From day t to $t+5$, provide enough water the crop required normally.
S10	未来 10 天无有效降雨 No effective rain in 10 days	从 t 至 $t+10$ 无有效降雨, 从 $t+10$ 至作物成熟, 满足作物生长的正常需水。 From day t to $t+10$, provide enough water the crop required normally.
S20	未来 20 天无有效降雨 No effective rain in 20 days	从 t 至 $t+20$ 无有效降雨, 从 $t+20$ 至作物成熟, 满足作物生长的正常需水。 From day t to $t+20$, provide enough water the crop required normally.
S30	未来 30 天无有效降雨 No effective rain in 30 days	从 t 至 $t+30$ 无有效降雨, 从 $t+30$ 至作物成熟, 满足作物生长的正常需水。 From day t to $t+30$, provide enough water the crop required normally.
Sm	平水年 Normal Year	从 t 至作物成熟, 降雨分布为该地区平水年情形。 From day t to crop matured, the rain distributes with a normal year pattern.

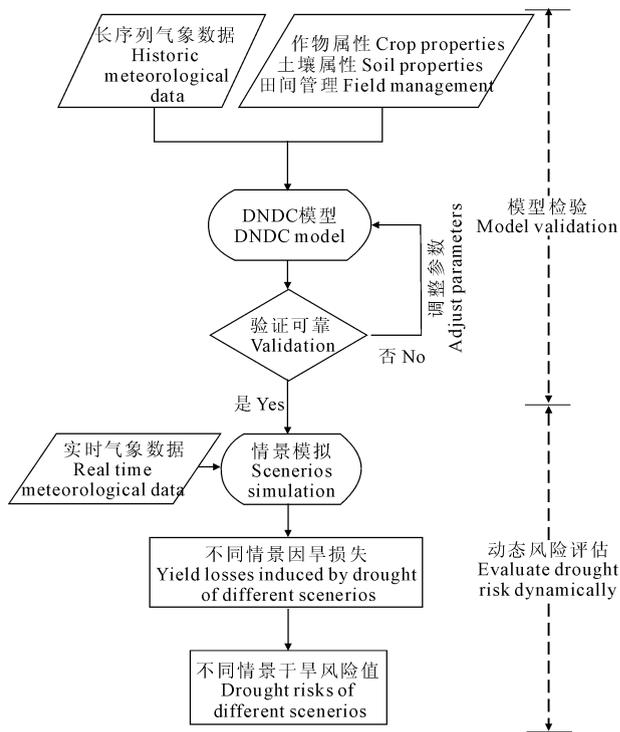


图 2 农业干旱灾害风险分析技术路线

Fig.2 The technology route for agricultural drought disaster risk analysis

利用产量与播种面积计算辽宁省的总产量, 对比模拟总产量与实际总产量如表 2。由于研究者所掌握的全省统计数据序列资料截至 2005 年, 所以只计算了 1995—2005 年的总产误差率为 14.52%。

3.2 粮食因旱损失计算结果

采用已经充分验证模型参数可靠性的 DNDC 模型, 模拟辽宁省各县级行政区 1995—2009 年的粮食产量, 计算粮食因旱损失。表 3 给出了辽宁省北部昌图县 1995—2005 年的因旱玉米损失。

表 2 1995—2005 年辽宁省模拟粮食总产量及误差

Table 2 The total yields and model errors of Liaoning Province in 1995—2005

年份 Year	模拟总产量 Simulated total yields/10 ⁴ t	实际总产量 Actual total yields/10 ⁴ t	误差 Errors/%	绝对误差率 Absolute error rate/%
1995	908.18	806.58	-101.60	12.60
1996	811.22	1048.09	236.87	22.60
1997	687.78	675.20	-12.58	1.86
1998	1011.56	1206.28	194.72	16.14
1999	759.61	989.25	229.64	23.21
2000	523.00	530.30	7.30	1.38
2001	721.82	825.36	103.54	12.54
2002	747.28	879.42	132.14	15.03
2003	837.33	931.56	94.23	10.12
2004	1059.01	1353.74	294.73	21.77
2005	1643.40	1341.79	-301.61	22.48
平均 Mean				14.52

根据年均损失绘制粮食因旱损失分布图(图 4)。可见, 辽宁省西北地区农业干旱灾害损失明显比其他地区要高, 这与实际情况相符, 该地区多丘陵山地, 干旱少雨, 土地贫瘠, 水土流失和土壤沙化比较严重, 属于干旱灾害严重地区; 辽中和辽南地区干旱灾害损失相对较低。

3.3 农业干旱灾害风险动态评估结果

本研究分析了每个地区历年及平均粮食损失率, 提出了基于粮食因旱损失率的农业干旱灾害风险等级划分标准(如表 4 所示), 将农业干旱灾害风险划分为 4 个等级, 分别为 I 级、II 级、III 级和 IV 级, 风险依次递减。

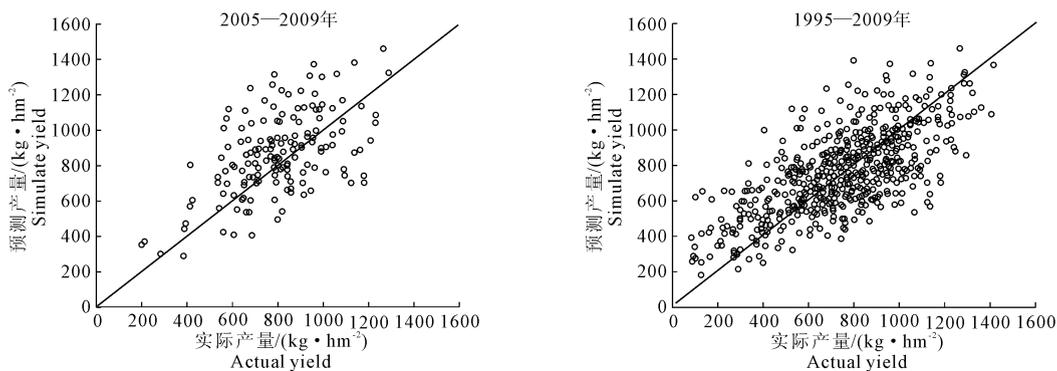


图 3 模拟产量与实际产量的散点图

Fig.3 The scatter plots of the simulated yields vs. the actual yields

表 3 昌图县 1995—2009 年粮食因旱损失/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 3 The yield losses induced by drought of Changtu County in 1995—2009

年份 Year	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
粮食因旱损失 Yield losses induced by drought	1082.3	3395.8	6256.5	1072.4	2641.9	5509.8	2567.3	1881.0
年份 Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	年均 Mean
粮食因旱损失 Yield losses induced by drought	1300.1	3260.8	452.6	6246.0	2296.8	1884.4	6898.0	3116.4

表 4 辽宁省农业干旱灾害风险等级划分

Table 4 The agricultural drought disaster risk level for Liaoning Province

划分指标 Index	Ⅳ级 Level IV	Ⅲ级 Level III	Ⅱ级 Level II	Ⅰ级 Level I
粮食损失率/% Yield loss rate	$R \leq 10$	$10 < R \leq 25$	$25 < R \leq 35$	$R > 35$

选择 2009 年 6 月 1 日为节点,对未来干旱灾害风险进行分析,获得不同情景模式下的粮食因旱损失,按照表 4 的农业干旱灾害风险等级划分依据,绘制 2009 年 6 月 1 日的辽宁省农业旱灾风险图(图 5)。从结果来看,辽西北地区仍然是此次干旱灾害的高风险地区。不同情景的风险图反应了干旱灾害风险的演化情况。就 2009 年 6 月 1 日的情况而言,农业干旱灾害风险普遍在Ⅳ级和Ⅲ级,属于低风险等级;如果未来 5 天左右无有效降雨,干旱灾害风险不会明显增加;如果未来 10 天左右无有效降雨,部分地区的干旱灾害风险将演变为Ⅲ级和Ⅱ级;如果干旱继续持续,局部出现Ⅰ级风险;如果长达一个月仍然无有效降雨,干旱灾害将在全省蔓延。对于平水年的情况,由于 6 月 1 日前土壤底墒较差,因此整体风险偏高。

4 结 论

本研究将 DNDC 模型用于玉米作物估产,估产误差为 14.52%。模型的参数率定是通过最小化模拟产量与实际产量的代价函数实现的,通过模型最后的输出控制调参过程,对于解决宏观尺度的问题比较适合,但是模拟的中间过程存在较大不确定性,误差相对增大。后续研究中,将考虑其它实地观测数据作为参考变量,进行更精确的参数率定。

采用基于粮食因旱损失的农业干旱灾害风险分析模型,将农业干旱灾害风险高低表示成粮食因旱损失的多少。采用 DNDC 模型进行作物生长模拟,实现了干旱灾害风险的动态评估,能够在作物生长阶段实时地评估未来的干旱灾害风险。此外,由于模型仅考虑作物受干旱胁迫情况下的粮食损失,因此,可以去除洪水、龙卷风等其他自然灾害的影响,所计算的粮食损失均为干旱灾害导致的。

研究提出了基于粮食因旱损失率的 4 级农业干旱灾害风险等级,与相应的旱情、旱灾等级和应急响应等级相对应,因此,具有较强的实际应用意义,在农业干旱显现时进行农业干旱灾害风险评估,根据旱情分析和风险评估的结果采取相应的响应措施。但风险等级的划分标准还有待更多的验证和改善。

从分析结果可以看出,辽宁省西北地区具有较高的农业干旱灾害风险,中部和南部风险相对较低。

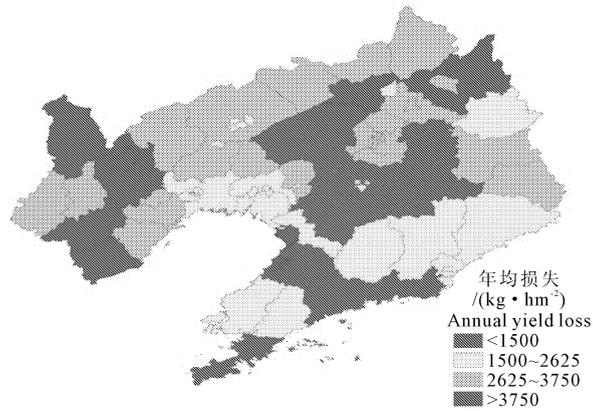


图 4 辽宁省年均农业干旱灾害损失分布

Fig. 4 The average annual losses map of agricultural drought disasters in Liaoning Province

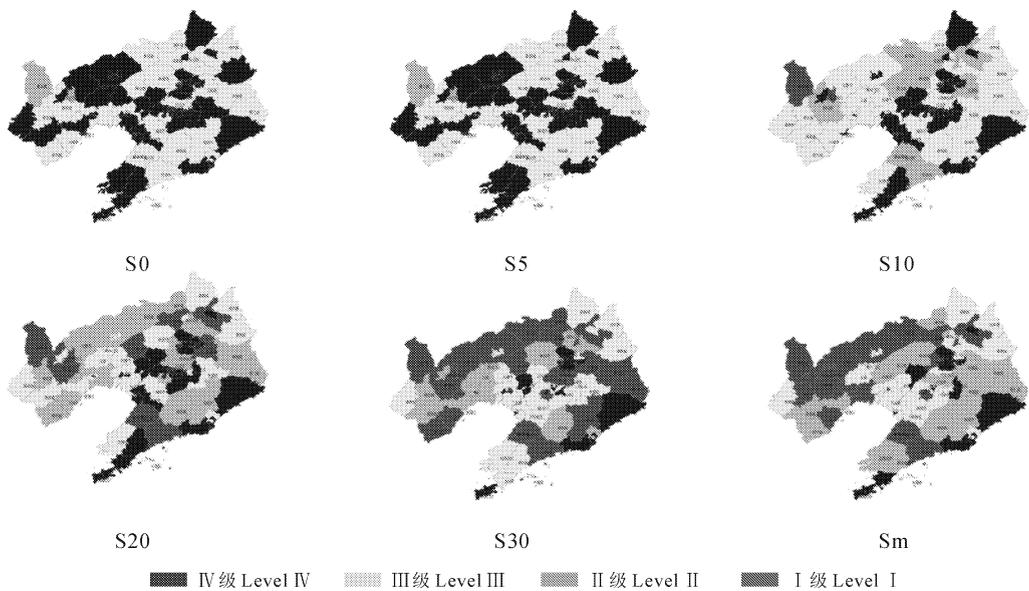


图 5 不同情景的农业干旱灾害动态风险(2009-06-01)

Fig. 5 The dynamic agricultural drought disaster risk of various scenarios

参考文献:

- [1] Gassman P W, Williams J R, Benson V R, et al. Historical development and applications of the EPIC and APEX models[R]. Iowa State: Iowa State University, Center for Agricultural and Rural Development, 2005.
- [2] 何 斌, 武建军, 吕爱锋. 农业干旱风险研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 557-564.
- [3] Kumar V, Panu U. Predictive assessment of severity of agricultural droughts based on agro-climatic factors[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(6): 1255-1264.
- [4] 李长生. 生物地球化学的概念与方法 - DNDC 模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99.
- [5] Wilhite A D, Neild E R. Determining drought frequency and intensity on the basis of plant response wild hay in the sand hills of Nebraska, USA[J]. Agricultural Meteorology, 1981, 25: 257-265.
- [6] 陈晓楠. 农业干旱灾害风险管理理论与技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [7] Quiring S M, Papakryiakou T N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118(1/2): 49-62.
- [8] YU Zhang, LI Changsheng, ZHOU Xiuji, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture [J]. Ecological Modelling, 2002, 151(1): 75-108.
- [9] LI Changsheng, Salas W, Deangelo B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1554-1565.
- [10] Hoogenboom G, Wilkens P W, Tsuji G Y. Dssat version 3, volume 4 [Z]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1999.
- [11] Boogaard H L, Van Diepen C A, Rötter R P, et al. WOFOST 7.1; User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5[R]. Wageningen, Netherlands: DLO Winand Staring Centre, 1998.