

基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期 干旱监测效果评价Ⅲ

——干旱对冬小麦产量的影响评估

李 艳^{1,2}, 王鹏新¹, 刘峻明¹, 张树誉³, 李 俐¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 河北科技师范学院城市建设学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 陕西省气象局, 陕西 西安 710014)

摘要: 选取关中平原 2002—2009 年冬小麦越冬后每年 3—5 月 9 旬的条件植被温度指数 (CVTI) 遥感干旱监测结果, 基于归一组合赋权法确定的冬小麦越冬后四个主要生育时期干旱对产量影响的最优权重, 建立关中平原 4 市 (不包括铜川) 冬小麦每年的加权 CVTI 与单产间的一元线性回归模型, 并对冬小麦的单产进行了估算。结果表明, 2002—2009 年关中平原冬小麦单产在波动中呈上升趋势, 中部单产较高, 西部次之, 东部最低。基于关中平原 4 市的整体产量估算模型预测西安市部分区县 2010 年的单产, 取得较好的结果, 验证了关中平原 4 市的整体产量估算模型具有较好的精度, 能够较准确地反映关中平原干旱对冬小麦产量的影响。

关键词: 条件植被温度指数; 归一组合赋权法; 产量; 干旱影响评估

中图分类号: S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)05-0218-05

Evaluation of drought monitoring effects in the main growth and development stages of winter wheat using vegetation temperature condition index Ⅲ .

——Impact evaluation of drought on wheat yield

LI Yan^{1,2}, WANG Peng-xin¹, LIU Jun-ming¹, ZHANG Shu-yu³, LI Li¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Urban Construction, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

3. Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

Abstract: Selected the drought monitoring results of remote sensing by the vegetation temperature condition index (VTCI) for winter wheat after the winter at the ten-day intervals from March to May of the years from 2002 to 2009 in the Guanzhong Plain, the optimal weights of drought impact on wheat yield at the 4 main stages were determined based on the normalized combination approach. A linear regression model of annual VTCI with wheat yield was established for the four cities in the Guanzhong Plain (except Tongchuan City) and estimated the yield of the winter wheat. The results showed that: The winter wheat yield presented a rising trend with fluctuation in whole Guanzhong Plain from 2002 to 2009, the yield in middle of the plain was the highest, the yield in the west plain was the second and the east plain was the lowest. Based on the whole yield estimating model of the four cities in the Guanzhong Plain to forecast the yields on parts counties and districts of Xi'an City in 2010, has obtained rather good results, validated the whole yield estimating model with rather good accuracy, can be accurately reflected the impact of drought on the wheat yield in the Guanzhong Plain.

Keywords: vegetation temperature condition index; normalized combination approach; yield; drought impact evaluation

收稿日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371390, 41071235); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B03); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100008110031)

作者简介: 李 艳(1987—), 女, 黑龙江大庆人, 在读硕士, 主要从事定量遥感及其在干旱预测中的应用研究。E-mail: liyan3311@126.com.

通信作者: 王鹏新(1965—), 男, 陕西礼泉人, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究。E-mail: wangpx@cau.edu.cn.

从农业生产考虑,干旱是在水分胁迫下,作物及其生存环境相互作用构成的一种旱生生态环境^[1]。农业干旱直接影响到农作物的产量,传统的产量预测方法有统计预测法、农学预测法、经济学预测法和气象学预测法等^[2]。随着遥感技术的迅速发展,其快速、宏观、经济等优点使遥感预测法在大面积信息获取中占有优势。基于遥感技术的产量预测方法是在收集、分析农作物不同生育时期光谱特征的基础上,通过传感器记录的地表信息识别作物类型、监测作物长势、预测作物产量的一系列方法,包括作物识别和播种面积提取以及长势监测和产量预报等。

我国应用卫星遥感技术进行农作物产量预报的研究始于“六五”期间,在“七五”、“八五”期间基于NOAA/AVHRR遥感影像对小麦、水稻、玉米等进行了估产研究^[3]。经过数十年的努力,我国农作物遥感估产取得了较大进展。从单一作物发展到多种作物,从小区域发展到大区域,从单一数据源发展到多种数据源的综合应用,从简单的光谱或指数统计模型发展到以作物生理生态机理为基础的区域作物生长模拟和遥感反演参数的同化模式,研究机理不断成熟,估产模式不断丰富,估算精度有所提高^[4-5]。

我国地处亚洲季风气候区,降水有明显的季节性和区域性,且年际变化大,导致我国干旱灾害频发。干旱引起小麦生长期间的水分胁迫,主要原因是从小麦播种到收获期间自然降水较少,导致土壤水分不足,不能供应小麦正常生长发育需要,进而影响小麦的产量和品质^[6]。构成小麦产量的主要因素是单位面积成穗数、平均穗粒数和千粒重。小麦生育前期受旱时,以单位面积成穗数的减少对产量的影响最大,其次是平均穗粒数;生育后期受旱对产量的影响较为显著,拔节-孕穗期受旱严重影响穗粒数,灌浆-成熟期受旱严重影响千粒重^[7]。研究表明,在我国北方地区,干旱与冬小麦产量有显著的相关性^[8]。

陕西省是我国干旱发生的高风险区,干旱缺水已成为制约陕西经济社会发展的瓶颈问题^[9]。关中平原是陕西省自然条件最好的地区,号称“八百里秦川”,集中了陕西省的大中城市,是陕西省粮食的主产区,农村经济的发展增长中心,一旦发生于旱将对社会经济造成严重影响。因此,评估关中平原干旱对农作物生产及其产量的影响对陕西省农业生产及经济社会发展有重要意义^[10]。本文应用关中平原2002—2009年冬小麦越冬后3—5月主要生育时期的VTCI,基于改进的层次分析法和变异系数法的归

一组合赋权法确定的各生育时期的权重,建立加权VTCI与冬小麦单产间的一元线性回归模型,研究干旱对冬小麦产量的影响。

1 研究方法

1.1 冬小麦主要生育时期加权VTCI的生成

将陕西行政区县边界的矢量图与研究区域的遥感影像叠加,获得关中平原的分市图(图1)。根据VTCI的计算方法^[11],生成2002—2009年每年3—5月以旬为单位的VTCI时间序列数据,取各市区内所包含像素的VTCI平均值作为该市的旬VTCI。将冬小麦越冬后划分为返青期、拔节期、抽穗-灌浆期和乳熟期四个主要生育时期,取各生育时期内所包含的多旬VTCI的平均值作为该生育时期的VTCI。如此,计算出关中平原每年各市冬小麦主要生育时期的VTCI。



图1 关中平原市区分市图

Fig.1 Cities distribution in the Guanzhong Plain

由于冬小麦不同生育时期干旱对产量的影响程度不同,我们运用多种赋权方法确定了各生育时期的权重^[12-13],并通过对比分析多组权重下加权VTCI与冬小麦单产的线性回归分析结果,根据决定系数 R^2 值最大原则,得出改进的层次分析法和变异系数法的归一组合赋权法为最优赋权方法。应用该方法确定的冬小麦主要生育时期的权重如表1。拔节期为冬小麦生长的关键生育时期,干旱对产量的影响权重最大,其次是抽穗-灌浆期,再次是乳熟期,最后是返青期。冬小麦主要生育时期相对重要程度的分析结果与小麦实际生长规律一致。

1.2 加权VTCI与冬小麦单产的回归分析

基于改进的层次分析法和变异系数法的归一组合赋权法确定的冬小麦主要生育时期的权重,建立关中平原5市加权VTCI(x)与小麦单产(y)间的一元线性回归模型(表2)。可以看出,渭南的决定系数 R^2 值超过0.55,咸阳和宝鸡的 R^2 值超过0.65,西安的 R^2 值达到0.7,除铜川外,其余4市的回归模型均通过 F 检验。铜川由于地处渭北平塬,是关中平原向陕北黄土高原的过渡地带,属于较干旱地

区,受地势和气候差异的影响,冬小麦的年际产量变化较大^[14],加权 VTICI 与单产间的线性相关性不显著。除去铜川,建立关中平原其余 4 市的加权 VTICI 与小麦单产间的整体线性回归模型,整体模型通过 F 检验,说明关中平原 4 市冬小麦的加权 VTICI 与单

产之间存在显著的线性相关性。因此,基于改进的层次分析法和变异系数法的归一组合赋权法确定的回归模型的精度较高,对关中平原冬小麦主要生育时期权重的确定较为合理,可用于开展关中平原干旱对冬小麦生产及其产量的影响评估研究。

表 1 基于改进的层次分析法和变异系数法归一组合赋权确定的冬小麦主要生育时期的权重

Table 1 The weights of the main growing stage of winter wheat determined by the improved analytical hierarchy process and variation coefficient method normalized combination approach

地区 Region	返青期 Turning green stage	拔节期 Elongation stage	抽穗-灌浆期 Heading-filling stage	乳熟期 Milk ripe stage
渭南 Weinan	0.051	0.691	0.170	0.087
咸阳 Xianyang	0.045	0.670	0.193	0.091
宝鸡 Baoji	0.045	0.689	0.182	0.084
西安 Xi'an	0.041	0.670	0.203	0.086
铜川 Tongchuan	0.046	0.716	0.152	0.086

表 2 基于改进的层次分析法和变异系数法归一组合赋权确定的关中平原加权 CVTI 与小麦单产的线性回归模型

Table 2 The Linear regression model of weighted CVTI with wheat yield determined by the improved analytical hierarchy process and variation coefficient method normalized combination approach

地区 Region	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	F 检验 F value
渭南 Weinan	$y = 2374.9x + 2232.8$	0.561	6.385
咸阳 Xianyang	$y = 2737.9x + 2559.1$	0.669	10.116
宝鸡 Baoji	$y = 7183.8x - 626.2$	0.654	9.45
西安 Xi'an	$y = 2886.7x - 2726.3$	0.700	11.667
铜川 Tongchuan	$y = 855.6x + 2247.3$	0.173	1.042
关中平原 4 市 Four cities in the Guanzhong Plain	$y = 4300.6x + 1416.4$	0.440	20.431

注: $F_{\alpha}(1, n-2) = 4.06, \alpha = 0.10, n = 7; F_{\alpha}(1, n-2) = 2.89, \alpha = 0.10, n = 28$ 。

2 结果与分析

借助基于改进的层次分析法和变异系数法归一组合赋权确定的关中平原 4 市的整体回归模型,估算关中平原 4 市冬小麦的单产(图 2)。结果表明,2002 年,关中平原平均单产在 $3\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右;中部单产较高,部分地区达到 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;东部单产较低,在 $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。2003 年,大部分地区单产接近 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,少数地区接近 $4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;东部单产较低,在 $3\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。2004 年,平均单产在 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上;中部单产较高,部分地区接近 $4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;西部略高于东部。2005 年,关中平原大部分地区单产估算值在 $3\ 500\sim 4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。2006 年,单产估算值在 $4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,中部单产较高,东部略低于西部。2008 年,大部分地区单产超过 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,东部单产略低,少数地区在 $3\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。

2009 年,中西部地区单产接近 $4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,东部单产略低,在 $4\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。

研究年份间,关中平原冬小麦单产在波动中呈上升趋势。2002—2004 年,冬小麦单产逐年增加,2005 年略有减产,2006 年达到峰值,2008 年相对减产,2009 年又稍有增产。关中平原 4 市的整体产量估算结果符合东西部产量偏低,中部产量较高的特点。

结合关中平原 4 市冬小麦的历年单产统计数据,可以得出,基于改进的层次分析法和变异系数法归一组合赋权确定的关中平原 4 市的整体产量估算模型的结果与冬小麦实际产量的时空分布情况较一致。说明了 VTICI 可用于关中平原的干旱监测和冬小麦产量估算。

基于关中平原 2010 年 3—5 月 9 旬的 MODIS 数据的 VTICI 干旱监测结果,应用改进的层次分析法和变异系数法的归一组合赋权法确定的关中平原 4 市

的整体产量估算模型,对西安市部分区县冬小麦的产量进行了估算。结果表明,蓝田县、周至县和长安区的产量估算结果与实际单产接近。蓝田县的单产统计值为 $4\,245\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,估算值为 $3\,950\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,绝对误差为 $-295\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相对误差为 -6.95% ;周至县的单产统计值为 $4\,830\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,估算值为

$4\,207\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,绝对误差为 $-623\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相对误差为 -12.90% ;长安区的单产统计值为 $4\,875\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,估算值为 $4\,343\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,绝对误差为 $-532\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相对误差为 -10.91% 。以上分析结果说明,关中平原4市的整体产量估算模型可用于区县级冬小麦单产的估算。

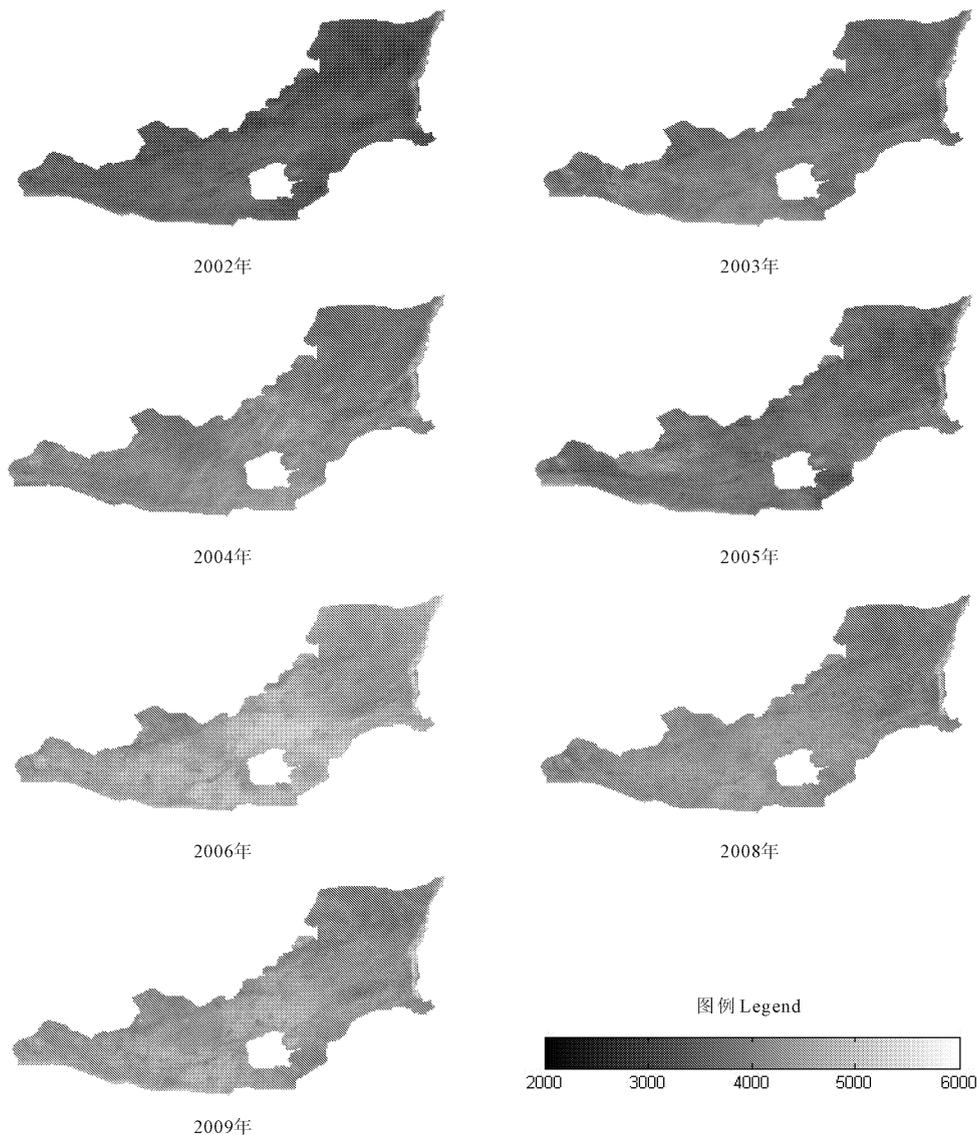


图2 2002—2009年关中平原4市冬小麦的整体产量估算结果/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Fig.2 The estimated results of whole winter wheat yields in the Guanzhong Plain from 2002 to 2009

3 结论与讨论

选取关中平原冬小麦2002—2009年的VTCI时间序列数据,基于改进的层次分析法和变异系数法归一组合赋权确定的冬小麦主要生育时期的权重,建立加权VTCI与小麦单产间的一元线性回归模型,除铜川外,关中平原其余4市的加权VTCI与小麦单产之间存在显著的线性相关性。关中平原4市(不

包括铜川)的整体产量估算模型精度较高,产量估算结果能够较准确地反映关中平原单产的空间分布和年际变化趋势,对区县级的单产预测取得较好的结果,证实了VTCI可用于研究关中平原干旱对产量的影响评估。这一研究成果可为农业相关部门提供决策信息,对抗旱减灾及分析农业生产效益具有一定的借鉴意义。

应用改进的层次分析法和变异系数法的归一组合

合赋权法确定的冬小麦主要生育时期的权重与专家意见确定的权重范围存在一定差异,今后的研究中需进一步分析关中平原的气候条件及冬小麦生长机理,更加准确合理地确定冬小麦主要生育时期的权重范围,并获取更多年份的数据,对模型进行验证。干旱的影响评估涉及农业、气象、水文、生态环境及社会经济等多方面,且评估工作不仅局限于评估它对农业生产造成的影响,还需要综合气候特征、人类活动等多种影响因素,科学评估干旱的综合影响。

参考文献:

- [1] 闫娜,杜继稳,李登科,等.干旱遥感监测方法研究应用进展[J].灾害学,2008,23(4):117-121.
- [2] 陈锡康,杨翠红.农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究[J].系统工程理论与实践,2006,(2):108-112.
- [3] 高峰,孙成权.我国“九五”遥感技术与应用研究发展战略与对策[J].地球科学进展,1995,10(2):123-132.
- [4] Nearing G S, Crow W T, Thorp K R, et al. Assimilating remote sensing observations of leaf area index and soil moisture for wheat yield estimates: An observing system simulation experiment[J]. Water Resources Research, 2012,48(5):1-13.
- [5] 刘良云,王纪华,黄文江,等.利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J].农业工程学报,2004,20(1):172-175.
- [6] 韩绍林.旱作农业与河南旱地小麦栽培[M].郑州:黄河水利出版社,2010:147-148.

- [7] Richard M W, Sam M, Juan A, et al. Effect of drought and the presence of the 1BL/1RS translocation on grain vitreosity, hardness and protein content in winter wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(3):457-468.
- [8] 宋艳琳,董文杰.1961—2000年干旱对我国冬小麦产量的影响[J].自然灾害学报,2006,15(6):235-240.
- [9] 方建刚,白爱娟.陕西春季干旱的环流特征分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):247-253.
- [10] 陈旭,郝明德,许晶晶,等.干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):159-163.
- [11] Sun W, Wang P X, Zhang S Y, et al. Using vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(17-18):5133-5144.
- [12] 李艳,王鹏新,刘峻明,等.基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价 I. 因子权重排序法和熵值法组合赋权[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):159-163.
- [13] 李艳,王鹏新,刘峻明,等.基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价 II. 改进的层次分析法和变异系数法组合赋权[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):236-239,262.
- [14] 黄弘,王鹏新,李俐.关中平原小麦生育期 VTCI 加权估算及其与小麦产量间的相关性研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):173-178.

(上接第 217 页)

参考文献:

- [1] 刘昌明,郑红星,王中根,等.流域水循环分布式模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2006.
- [2] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrological modeling and assessment part 1: model development[J]. Journal of The American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [3] 王中根,夏军,刘昌明,等.分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22(4):649-655.
- [4] 李慧,靳冕,雷晓云,等.SWAT模型参数敏感性分析与自动率定的重要性研究[J].水资源与水工程学报,2012,21(1):79-82.
- [5] 任秀文,姜国强,钟满妮,等.SWAT模型参数敏感性分析及增江流域的应用[C]//中国环境科学学会学术年会论文集,2011:262-268.
- [6] 朱丽,秦富仓,姚云峰,等.SWAT模型敏感性分析模块在中尺度流域的应用——以密云县红门川流域为例[J].水土保持研究,2011,18(1):161-165.
- [7] Abbaspour K C. SWAT Calibration and Uncertainty Programs[M]. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag,2007:95.
- [8] Schoul J, Abbaspour K C, Yang H, et al. Modeling blue and green water availability in Africa[J]. Water Resources Research, 2008,

VOL44:W07406. doi:10.1029/2007WR006609.

- [9] Yang J, Reicher P, Abbaspour K C, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT Application to the Chaohe Basin in China[J]. Journal of Hydrology, 2008,358(1-2):1.
- [10] 刘智勇.基于 SWAT-SUFI 模型的黄土高原典型流域径流模拟及水资源管理系统的开发[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [11] 左德鹏,徐宗学.基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的渭河流域月径流分布模拟[J].北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(5):490-496.
- [12] Duan Q, Sorooshian S, Gupta HV, et al. Global optimization for watershed model calibration, in calibration of watershed model[M]. Washington DC, American Geophysical Union, 2003.
- [13] Sorooshian S, Duan Q, Gupta V K. Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting Model[J]. Water Resources Research, 1993,29:1185-1194.
- [14] Duane Q Y, Sorooshina S, Gupta V K. Optimization use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2001,251:103-109.
- [15] 白薇,刘国强.SWAT模型参数自动率定的改进与应用[J].中国农业气象,2009,30(增2):271-275.