

基于 SWAT 模型的阿克苏河流域径流模拟

祁敏, 张超

(西南林业大学, 昆明 650224)

摘要:阿克苏河流域地处中国西北干旱区域,受高寒气候影响,其冰川和积雪融化补给对流域径流量变化、区域水资源合理优化及生态环境的保护影响重大。结合阿克苏河流域融雪径流的产流、汇流的独特之处,应用 SWAT 分布式水文模型对其月均径流进行了模拟研究。收集阿克苏河流域 7 个气象站点 1980—2013 年的逐日观测数据和阿拉尔水文站 2000—2013 年月均实测径流数据,基于 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据,建立适合阿克苏河流域的融雪径流模型并进行月均径流的模拟。结果表明:SWAT 模型在阿克苏河流域具有良好的适用性,校准期和验证期相对误差 R_E 均在 8% 以内,决定性系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 NS 均高于 0.82,达到了模型的评价标准,为高海拔干旱区建立分布式水文模型提供了参考。

关键词:阿克苏河流域; SWAT 模型; 径流模拟; 月均径流

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0283-05

Runoff Simulation in Aksu River Basin Based on SWAT Model

QI Min, ZHANG Chao

(Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The Aksu River Basin is located in the arid northwest China, which has a large area of glacier and snow. In the situation of water scarcity, the runoff change has a great influence on reasonable optimization of water resources and the protection of ecological environment. In order to study the characteristics of snowmelt runoff in Aksu River Basin, SWAT, the distributed hydrological model, was used to simulate the monthly snowmelt runoff. The DEM data, landuse data, soil data were collected to build the geographic information database. The daily meteorological data from 7 national meteorological stations in Aksu River Basin during the period from 1980 to 2013 and the observed monthly hydrological data of the Alaer hydrological station in the Aksu River Basin were used to simulate the monthly runoff. The results indicated that the SWAT model had a good applicability for Aksu River basin. The relative error(R_E) of the model between the simulated results and the observed data was less than 8% both in calibration and validation. The coefficient of determination (R^2) and the Nash-Sutcliffe (NS) were both larger than 0.82. The SWAT model meets the evaluation criteria and provides the reference for developing the distributed hydrological model in the arid region of high altitude.

Keywords: Aksu River Basin; SWAT model; runoff simulation; monthly runoff

阿克苏河流域是塔里木河的主要补给来源,其径流量变化直接影响着塔里木河流域生态、经济的可持续发展^[1]。近年来,随着阿克苏流域人口的剧增和工农业的快速发展,各种用水问题逐渐凸显出来,水质污染严重、水资源的过度开发利用、大量洪旱事件的发生等,督促着人们开始对水文学进行定量化研究^[2],以确保水资源的合理利用,这就需要水文模型的协助。冰雪融水是阿克苏河流域径流的主要组成部分,在水文模拟

中发挥着至关重要的作用,因此研究高山区的融雪径流模拟对于灾害监测和预报具有不可小觑的意义^[3]。纵观国内外,不少学者致力于利用分布式水文模型进行径流模拟^[4-7],但对高海拔干旱区的水资源采用模型模拟的方法进行研究的相对较少。本文选取目前较为成熟的分布式水文模型——SWAT 模型,结合阿克苏流域 7 个气象站站点 1980—2013 年的逐日气象数据、DEM 数据、土壤数据、土地利用数据以及阿

拉尔水文 2000—2013 年实测月均径流数据,并借助 SWAT-CUP 软件在阿克苏流域进行融雪径流模拟研究,以 2000—2006 年的实测数据进行参数率定,2007—2013 年的实测数据进行模型的验证,探索 SWAT 模型在该区域的适宜性,对研究治理阿克苏流域水资源问题乃至生态环境问题具有重要意义和一定参考价值。

1 研究区概况

阿克苏河流域地处天山中段西部地区、塔里木盆地西北边缘(75°35′—80°59′E,40°17′—42°27′N)^[8],是塔里木河的主要补给来源,于喀拉都维处由托什干河及库玛拉克河汇流而成流域全长 530 km,总面积 5.2 万 km²,覆盖阿克苏西部部分地区及吉尔吉斯斯坦东部部分地区,其中境内面积 3.1 万 km²,境外面积 1.9 万 km²。该区地势西北高,东南低,垂直地带分布显著,从高到低依次为高山积雪带、亚高山/高山草甸带、中山森林带、低山丘陵带、山前平原带^[9]。属温带大陆性干旱气候,年均气温 9.8℃,气候干燥,降雨稀少,年均降水量 135.88 mm,蒸散发量大。流域径流主要来源于山区的冰雪融水和大气降水,还有少量地下水的补给。

2 SWAT 模型原理

SWAT 模型的地表径流模拟分为两个阶段:陆面阶段和河水面阶段。陆面阶段即产流和坡地汇流阶段,它控制各个子流域中水、泥沙、营养物质和化学物质等向主河道的输入量。水面阶段即河道汇流阶段,包括主河道汇流和水库汇流,模拟水、泥沙和营养物质等向流域总出口的输移过程^[10]。SWAT 模型水文模拟基于下列水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})$$

式中:SW_t为土壤最终含水量(mm);SW₀为第*t*天时的土壤初始含水量(mm);*t*为时间(d);R_{day}为第*i*天的降水量(mm);Q_{surf}为第*i*天的地表径流量(mm);E_a为第*i*天的蒸散发量(mm);W_{seep}为第*i*天存在于土壤剖面底层渗透量和侧流量(mm);Q_{gw}为第*i*天的地下水含量(mm)。

SWAT 模型根据日均气温的不同,将降水划分为降雨、冻雨和降雪,并对积雪和融雪采用不同的计算方法。

积雪平衡方程为:

$$SNO_2 = SNO_1 + R_{\text{day}} - E_{\text{sub}} - SNO_{\text{melt}}$$

式中:SNO₂为总积雪含水量(mm);SNO₁为计算日积雪的含水量(mm);R_{day}为计算日的降水量(mm)(仅当临界温度高于日平均气温时成立);E_{sub}为计算日

的雪升华量(mm);SNO_{melt}为计算日的融雪量(mm)。

在地形等外界因素的影响下,整个流域的积雪分布状态并非为均匀性。鉴于流域的积雪覆盖面积与积雪量间存在一定的相关性,SWAT 模型采用一条面积减少曲线来描绘二者之间的关系^[11]。面积减少曲线函数表达式为:

$$SNO_{\text{cov}} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \left[\frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp \left(\text{cov}_1 - \text{cov}_2 \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right]^{-1}$$

式中:SNO_{cov}为 HRU 的积雪覆盖率;SNO 为模拟日降雪的含量(mm);SNO₁₀₀为完全覆盖率时的雪深值(mm),cov₁和 cov₂分别为面积减少曲线上 95%覆盖率和 50%覆盖率对应的曲线系数。面积减少曲线仅在积雪量在 0 到 SNO₁₀₀ 范围内才会影响融雪过程,此时才会调用它来计算积雪覆盖率。

融雪平衡方程为:

$$SNO_{\text{melt}} = b_{\text{melt}} SNO_{\text{cov}} \left[\frac{T_{\text{snow}} + T_{\text{mx}} - T_{\text{melt}}}{2} \right]$$

其中

$$b_{\text{melt}} = \frac{b_{\text{melt6}} + b_{\text{melt12}}}{2} + \frac{b_{\text{melt6}} - b_{\text{melt12}}}{2} \sin \left[\frac{2\pi}{365} (d_n - 81) \right]$$

$$T_{\text{snow} < d_n} = T_{\text{snow}(d_n - 1)} \cdot (1 - \lambda_{\text{sno}}) + \overline{T_{\text{av}}} \cdot \lambda_{\text{sno}}$$

式中:SNO_{melt}为模拟日的融雪量(mm);b_{melt}为模拟日的融雪因子[mm/(d·℃)];T_{snow}为模拟日的积雪温度(℃);T_{mx}为模拟日的最高气温(℃);T_{melt}为融雪温度阈值(℃);b_{melt}为模拟日的融雪因子[mm/(d·℃)];b_{melt6}为夏至日(6月21日)的融雪因子[mm/(d·℃)];b_{melt12}为冬至日(12月21日)的融雪因子[mm/(d·℃)];d_n为模拟日所在那年的天数(d);T_{snow < d_n}为模拟日的积雪温度(℃),T_{snow < d_n - 1}为模拟日前一天的积雪温度(℃);λ_{sno}为积雪温度滞后因子;T_{av}为模拟日的平均气温(℃)。

3 阿克苏河流域 SWAT 模型建立

3.1 基础数据库建立

(1) DEM 数据。目前,数字高程模型(DEM)是用于地形分析的主要模型。本文采用中国科学院国际科学数据服务平台提高 30 m×30 m 的 DEM 数据,经过投影转换,利用研究区边界进行裁剪,得到最终所需的流域 DEM 影像图。

(2) 土地利用数据。基于中国科学院计算机网络信息中心提供的 2014 年 30 m×30 m 的 Landsat TM/ETM/OLI 遥感影像,配合外业调查中建立的解译标志,采用监督分类和目视解译相结合的方法,以 19 类二级景观要素为分类系统,进行研究区各类地物的遥感信息提取和分类,得到研究区 2014 年的土地利用分类图。对比 SWAT 模型分类标准建立索引表并进行重分类,最终得到模型所需的土地利用类型

图,重分类统计见表 1。

表 1 阿克苏河流域土地利用/覆盖类型及重分类统计

编号	名称	SWAT 代码	百分比/%
2	果园	ORCD	3.33
5	交通用地	UTRN	0.15
6	水域	WATR	9.46
9	低覆盖草地	SWRN	15.85
11	水田	RICE	0.61
12	耕地	AGRL	6.00
31	有林地	FRST	1.48
32	灌木林地	SESB	24.49
41	草地	PAST	19.00
43	干草	HAY	19.41
202	城镇居民地	URML	0.19
203	农村居民点	URLD	0.02

(3) 土壤数据。土壤数据的质量好坏直接影响着模型模拟结果的准确度^[12]。模型需要的土壤数据包括土壤类型分布图和土壤物理属性数据。土壤类型分布图来自联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界和谐土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD),分类系统为 FAO—90,数据分辨率为 1 km。利用研究区边界进行裁剪,并结合实际情况对土壤类型重新分类,重分类统计见表 2。SWAT 模型径流模拟还需土壤的物理属性数据,因此需要建立土壤属性数据库。

表 2 阿克苏河流域土壤类型及重分类统计

编号	名称	SWAT 代码	百分比/%
10	淡栗钙土	danligaitu	1.08
13	棕钙土	zonggaitu	3.54
18	石膏灰漠棕土	shigaohuizongmotu	5.32
19	荒漠风沙土	huangmofengshatu	0.70
20	石灰草甸土	shihuicaodianu	1.76
21	盐化草甸土	yanhuacaodianu	50.58
22	林灌草甸土	linguancadianu	2.44
23	潮土	chaotu	6.26
33	草毡土	caozhantu	4.53
39	冰川雪被	ice	5.39
47	灰棕漠土	huizongmotu	8.69
49	龟裂土	junlietu	0.46
53	碱化盐土	jianhuayantu	9.24

(4) 气象数据。SWAT 模型所需要的气象数据包括气象站点的经纬度、高程值和观测数据。本文选取阿克苏河流域 7 个国家一、二级气象自动观测台站 1980—2013 年的逐日观测数据,包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日平均风速和日相对湿度等,数据来源于气象数据共享网地面气候资料日值数据集。所有数据按照模型要求存储,并建立 WGEN_user 气象数据库。

(5) 径流数据。径流数据采用阿拉尔水文站 2000—2013 年实测月均径流资料。

3.2 子流域划分及水文响应单元确定

子流域划分是水文响应单元划分的基础。SWAT 模型模拟过程中,首先基于 DEM 数据按照模型默认生成的集水面积阈值进行河网提取,确定阿拉尔水文站为流域总出水口并自动划分子流域。最终确定阿克苏河流域总面积为 52 882.2 km²,共划分 18 个子流域(图 1),最小 113.4 km²,最大 9 330.6 km²,平均面积为 2 937.9 km²。

对土地利用类型图和土壤类型图分别进行重分类,并将重分类结果与坡度分级数据叠加分析,采用 Multiple HRUs 算法最终确定 HRU 的划分,生成 201 个 HRUs。

4 结果与分析

4.1 参数敏感性分析及率定

调用 SWAT-CUP(SWAT Calibration Uncertainty Procedures)程序中的 SUFI-2 模型来进行参数的敏感性分析、率定及验证等过程。SWAT-CUP 全局敏感性分析中,通过 p-Value 和 t-Stat 两个指标来评价参数的敏感性^[13]。p-Value 值越接近零,t-Stat 绝对值越大,则表示参数的敏感度越强。本文选定 12 个敏感性较强的参数(表 3)。参数的率定有手动率定和自动率定两种方式。鉴于随着率定方式的不断发展,自动率定已成为未来的发展趋势,本文利用 SWAT-CUP 通过自动率定的方式,根据模型每轮迭代所给出的参数下一轮迭代的最佳范围,不断缩小参数的范围,以寻求最佳的参数值,使模型的模拟结果达到最优状态。

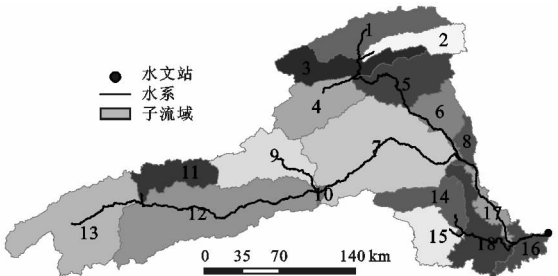


图 1 阿克苏河流域子流域划分图

4.2 模型模拟结果评价

本文设置 1998—1999 年为预热期,选择阿拉尔水文站 2000—2006 年实测月均径流值进行模型校准,选择 2007—2013 年实测月均径流值进行模型验证。为了评价模型的模拟精度,选用相对误差 R_E 、决定性系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 NS 三个指标(表 4)来进行判断。

由表 4 可知,校准期月均径流模拟值为 138.7 m³/s,比实测值 145.6 m³/s 低了 6.9 m³/s,但总体趋势基本一致,相对误差 R_E 为 -4.75%,决定性系

数 R^2 和效率系数 NS 均为 0.89,模型模拟效果较好。验证期模型相对误差 R_E 为 -7.98% ,模拟值相对于实测值偏低,决定性系数 R^2 为 0.84,效率系数 NS 为 0.82,除个别月份模拟值大于实测值外,整体比实测值偏小,基本上能反映实际径流量的变化趋势,满足模型的模拟要求。

表 3 敏感性参数分析结果

序号	参数名	参数含义	SWAT 模型提供的参数范围
1	CN2	SCS 径流曲线数	35~98
2	CH_K2	主河道有效水力传导系数	$-0.01\sim500$
3	CH_N2	主河道曼宁系数	$-0.01\sim0.3$
4	SMFMX	最大融雪因子	0~20
5	SLSUBSN	平均坡长	10~150
6	SFTMP	降雪温度	$-5\sim5$
7	HRU_SLP	平均坡度	0~1
8	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0~1
9	SOL_BD	土壤容重	0.9~2.5
10	ALPHA_BF	基流消退系数	0~1
11	GW_DELAY	地下水滞后时间	0~500
12	GW_REVAP	浅层地下水再蒸发系数	0.02~0.2

表 4 校准期和验证期月径流模拟结果评价

时期	实测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 $R_E/\%$	相关性系数 R^2	效率系数 NS
校准期	145.6	138.7	-4.75	0.89	0.89
验证期	136.4	125.5	-7.98	0.84	0.82

2000—2006 年校准期模型实测值与模拟值对比结果见图 2。2007—2013 年验证期模型实测值与模拟值对比结果见图 3。校准期与模拟验证期,两个时期中月径流量模拟值和实测值峰值出现的时间均一致。其中,校准期 2002 年和 2006 年的模拟效果最好,2000 年、2003 年、2004 年、2006 年次之。验证期模拟效果较好的年份为 2009 年、2001 年和 2012 年。

11 月到次年 4 月为阿克苏河流域的积雪期,气温普遍偏低,降雨量少。由于河水封冻,径流量极小,径流补给主要以降雨为主。5—10 月为阿克苏河流域的降雨期,随着春季气温的回升,冰雪融水增加,导致径流量明显增大,到夏季径流量达到峰值,径流补给主要以冰雪融水为主。由图 2—3 可以看出,以冰雪融水为主要补给的时段,趋势基本一致,但存在个别月份的模拟值比实测值偏高或偏低的情况。这是由于阿克苏河流域地形复杂,高程变化较大,地形会对径流的模拟产生一定的影响。但在以降雨作为主要补给的时段径流拟合效果较好,整体上模拟的效果很好。

为了确定气候变化对阿克苏河流域径流变化的影响,在保证其他气象状况不变的前提下,在现有气

象数据的基础上对气温分别减少 2°C 和增加 2°C ,利用 SWAT 模型进行模拟,模拟结果见图 4。从图 4 可以看出,气温的变化对径流的模拟结果影响显著。气温与径流量呈负相关性,径流量随着温度的升高而有所减小,随着温度的降低而有所增大。气温的变化对径流量的影响主要集中于夏季高温季节,其中,8 月份变化幅度最大,达 29.1% 。这是由于温度的升高会促使蒸发作用加大,从而使得径流量相对减少。

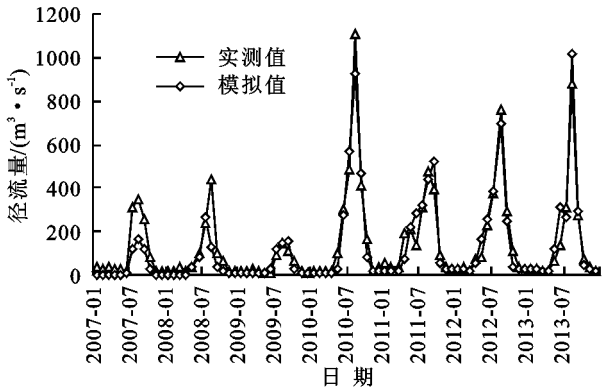


图 2 校准期月均径流量实测值和模拟值对比

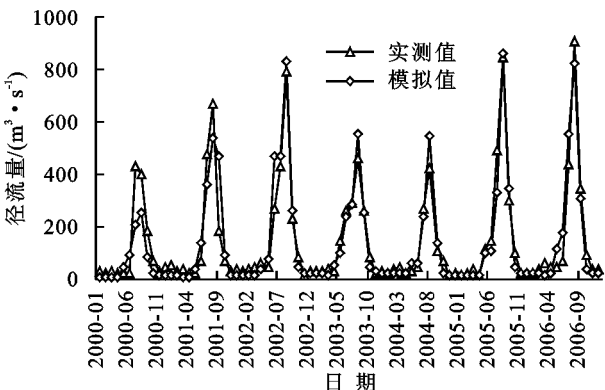


图 3 验证期月均径流量实测值和模拟值对比

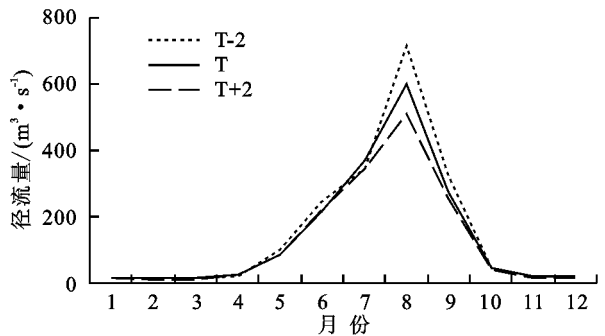


图 4 不同气温下年径流模拟研究

5 结论

(1) 尽可能地收集阿克苏河流域的 DEM 数据、土地利用数据、土壤数据、多年逐日实测气象数据及水文数据,构建了符合阿克苏河流域的土地利用数据库、土壤数据库及气象数据库,确保了模拟结果的真实性及可靠性。

(2) 建立了阿克苏河流域的月均径流模拟模型。校准期和验证期模拟结果均低于实测值,但总体上与实测数据径流趋势保持一致。验证期模拟值和实测值的相对误差 R_E 小于 8%, 相关系数 R^2 和效率系数 NS 均大于 0.8, 表明模型在阿克苏河流域径流模拟适用性较好。

(3) 冰雪融水是阿克苏河流域径流的重要组成部分。以降雨作为径流主要补给时段的模拟效果优于以冰雪融水作为主要补给的时段, 主要是由于径流的模拟结果会受地形的影响而产生误差, 但总体上模型的拟合效果良好。

(4) 气温是影响阿克苏河流域径流变化的重要因素。气温与径流量呈反比, 径流量随着气温的升高而有所减小, 随着气温的降低而有所增大。不同气温下, 径流量差异显著, 气温变化对夏季高温季节融雪径流量的变化影响最大。

参考文献:

- [1] 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 215-177.
- [2] 朱凯. 新疆阿克苏河流域径流演变规律及预测研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [3] 李慧, 雷晓云, 等. 基于 SWAT 模型的山区冰雪融水河流的日径流模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 105-107.
- [4] Berhara S, Panda R K. Evaluation of management alter-

natives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 113(1/4): 62-72.

- [5] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 290-299.
- [6] Chanasyk D S, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(2): 137-153.
- [7] 赖正清, 李硕, 李呈罡, 等. SWAT 模型在黑河中上游的改进与应用[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1404-1413.
- [8] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 阿克苏河源流区径流量与降水量丰枯变化和相关性研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 741-750.
- [9] 周德成, 罗格平, 尹昌应, 等. 近 50a 阿克苏河流域土地利用/覆被变化过程[J]. 2010, 32(2): 275-284.
- [10] 郑宁. 基于 SWAT 模型博阳河上游流域径流模拟及其气候变化响应[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [11] 库路巴依, 胡林金, 陈建江, 等. 基于 SWAT 模型的叶尔羌河山区融雪径流模拟[J]. 人民黄河, 2015, 37(4): 29-32.
- [12] 孙瑞, 张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, 30(3): 28-32.
- [13] 陈岩. 基于 GIS 和 SWAT 模型的母猪河流域径流模拟[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.

(上接第 282 页)

- [11] 李新平. 中国生态农业的理论基础和研究动态[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(6): 341-345.
- [12] 李太平, 桑闰生, 马万明. 论生态农业的发展[J]. 中国农史, 2011, 30(2): 122-128.
- [13] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1127-1134.
- [14] 杨铭. 国外生态农业的发展趋势对我国西部农业发展的启示[J]. 世界地理研究, 2003, 12(4): 71-77.
- [15] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [16] 陈卫平. 中国农业生产率增长、技术进步与效率变化: 1990—2003[J]. 中国农村观察, 2006(1): 19-23.
- [17] 郭军华, 倪明, 李帮义. 基于三阶段 DEA 模型的农业生产效率研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2010(12): 27-38.
- [18] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证: 基于非期望产出的 SBM 模型分析[J]. 生态学报, 2013,

33(12): 3837-3845.

- [19] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978—2008 年[J]. 经济学, 2014(1): 537-557.
- [20] 钱丽, 肖仁桥, 陈忠卫. 碳排放约束下中国省际农业生产效率及其影响因素研究[J]. 经济理论与经济管理, 2013(9): 100-112.
- [21] 姜峰, 崔春红. 基于清单分析的江苏省农业面源污染时空特征及源解析[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 961-967.
- [22] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 751-755.
- [23] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [24] 尹科, 王如松, 周传斌, 等. 国内外生态效率核算方法及其应用研究述评[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3595-3605.
- [25] 潘兴侠. 我国区域生态效率评价, 影响因素及收敛性研究[M]. 南昌: 南昌大学, 2014.