

DOI: CNKI: 32 - 1309/P. 20110115. 2245. 013

SRA1B 情景下中国主要作物需水预测

丛振涛, 姚本智, 倪广恒

(清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 分析气候变化下中国主要作物需水规律, 有助于从粮食安全与水资源可持续利用角度应对气候变化。根据 IPCC 提供的 SRA1B 情景下大气环流模式 MIROC3.2 的输出, 利用 FAO Penman-Monteith 公式计算参考作物腾发量; 根据 FAO 作物系数、SAGE 作物分布与柯本气候分类, 得到计算单元的作物系数, 根据参考作物腾发量与作物系数估算作物需水量; 考虑需水与有效降水旬尺度的随机匹配, 预测 SRA1B 情景下未来 50 年中国各地区主要作物的灌溉需水量。结果表明, 参考作物腾发量总体上呈上升趋势, 全国平均增加约 8%; 作物需水量总体上呈增加趋势, 东北地区平均增加约 10%; 灌溉需水量总体上呈增加趋势, 东北与华南增加显著。分析表明, SRA1B 情景下气温升高是作物需水量增加的主要原因, 降水的增加使华北地区灌溉需水量的增加不显著, 降水的减少使东北与华南灌溉需水量显著增加。

关键词: 气候变化; 作物需水; 灌溉需水; SRA1B

中图分类号: S274.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)01-0038-06

气候变化问题已引起各国政府、研究机构和公众的广泛关注, 对农业生产的影响是气候变化影响的重要方面。气温增加、CO₂ 浓度变化、降水量及其在生长期分布变化都会对作物生长产生直接影响, 从而影响粮食产量。与此同时, 作物生长需要消耗水分, 农业灌溉用水量占我国总用水量的 60% 以上。开展气候变化对作物耗水及灌溉需水的影响研究, 有助于加深气候变化对农业生产与水资源影响的认识, 响应粮食安全与水资源可持续利用的国家需求。

气候变化条件下作物生长的改变必然引起作物耗水的改变, 进而影响灌溉需水。气候变化下作物需水研究可以以 Penman-Monteith 等潜在腾发量的计算公式为基础, 分析气候变化对作物需水的影响^[1-2]。气候变化对作物耗水的影响可以通过气候模式模拟未来情景下的气象条件, 然后利用作物生长模拟模型定量模拟未来气象条件下的作物耗水与灌溉需水。气候变化的情景, 大多数的研究采用 IPCC 提出的 SRES(Special Report on Emission Scenarios)系列情景; 气候变化的模拟, 以大气环流模式(General Circulation Models, GCMs)为代表^[3]。气候变化对作物耗水及灌溉需水的研究, 关注灌溉需水量变化的较多, 代表性的研究包括全球范围^[4]、美国^[5]、以色列^[6]、中国^[7]等。这些研究一般认为未来气候变化情景下, 灌溉需水量将有所增加, 增加幅度为 10% ~ 30%^[8-9]。

本文采用 IPCC 提供的 SRA1B 情景下大气环流模式 MIROC3.2 的输出, 利用 FAO Penman-Monteith 公式估算参考作物腾发量; 结合 FAO 作物系数、SAGE 作物分布与柯本气候分类获得作物系数, 然后估算作物需水量; 考虑需水与有效降水旬尺度的随机匹配, 得到 SRA1B 情景下中国各地区主要作物灌溉需水量。

1 数据与方法

1.1 气候变化情景与 MIROC 模式

IPCC 第四次报告共提供了 8 种气候变化情景, 20C3M 情景是指温室气体按 20 世纪增加速率增加, 其

收稿日期: 2010-02-13; 网络出版时间: 2011-01-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110115.2245.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979039)

作者简介: 丛振涛(1973-), 男, 辽宁瓦房店人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: congzht@tsinghua.edu.cn

1961~1990年的模拟结果作为现状气象条件; SRA1B情景是指经济高速增长, 人口增长缓慢, 新技术迅速得到应用, 是可能性较大的一种情景, 本文以 SRA1B情景2046~2065年的预测结果作为未来气象条件, 研究50年后作物需水的变化趋势。

全世界有很多研究机构开发了各自的 Global Climate Model(GCM)模式, 并预测了各种气候情景下的几个气象要素。为了能够应用 Penman-Monteith 公式计算参考作物腾发量, GCM 模式预测的气象要素中必须包括短波辐射、最高最低气温、大气压、相对湿度、风速。根据这一限制条件并考虑各 GCM 模式的空间分辨率, 本文选用了由日本3个研究机构(CCSR、NIES、FRCGC)共同开发的高分辨率 MIROC3.2 模式(Model for Interdisciplinary Research on Climate)。该模式预测了 IPT02X、20C3M、PICTL、SRA1B、SRB1 5种情景下上述全部的气象要素。其空间分辨率为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$, 是所有 GCM 模式中最高。各气候变化情景下的 MIROC3.2 输出可以在 IPCC 的数据中心下载。

1.2 参考作物腾发量

参考作物腾发量(ET_0)是指从一个标准的“参照表面”发生的腾发量。FAO 定义了参照表面为高度均匀、生长旺盛、完全覆盖土表并且供水充足的草地, 其高度为 0.12 m, 表面阻力为 70 s/m, 反射率为 0.23。根据参照表面, FAO 提出了计算参考作物腾发量的 FAO Penman-Monteith 公式^[10]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (1)$$

式中 ET_0 为参考作物腾发量, mm/d; R_n 为冠层表面净辐射, MJ/($m^2 \cdot d$); G 为土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$); T 为日平均气温, $^\circ C$; u 为风速, m/s; e_s 为饱和水汽压, kPa; e_a 为实际水汽压, kPa; $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差, kPa; Δ 为水汽压曲线斜率, kPa/ $^\circ C$; γ 为湿度计常数, kPa/ $^\circ C$ 。

以上计算 ET_0 所需的变量中, 温度、湿度、风速是 MIROC 模式的输出结果, 其余可由 MIROC 模式的输出结合纬度、日期等间接计算。

1.3 作物系数与作物需水量

作物需水量(ET_c)可由参考作物腾发量(ET_0)乘以作物系数(K_c)得到。

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (2)$$

FAO56 中给出了全球各种主要作物的播种日期、各生长阶段的长度以及一般气候条件下(亚湿润型气候、白天最小相对湿度约 45%、平均风速约 2 m/s)的典型作物系数值^[10]。美国 Wisconsin 大学的 SAGE 研究中心提供了 1992 年全球 18 种主要作物的分布数据。同种作物在不同的气候条件下生长状况有差别, 利用柯本气候分类将全球的气候分为 5 个气候带, 即热带气候带、干燥气候带、温暖气候带、大陆性气候带、极地气候带, 同一作物在不同气候带的作物系数有所不同。

SAGE 给出了全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格上 18 种主要作物的分布情况, 即每种作物的收获面积占网格面积的比例。利用 FAO 作物系数、SAGE 作物分布和柯本气候分类, 可以得到各个网格上的作物系数。

以 MIROC 模式结果计算得到的 ET_0 的空间分辨率为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$, 以 SAGE 作物分布得到的作物系数的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 将分辨率较低的 ET_0 数据插值到作物系数网格上。

1.4 灌溉需水量

根据 MIROC 模式模拟的降水, 以美国土壤保持局 USDA-SCS 方法计算有效降水, 其公式为

$$P_e = SF(1.2525P_1^{0.8242} - 2.9352)(10^{9.5512 \times 10^{-4} ET_c}) \quad (3)$$

式中 P_e 为月有效降水量, mm, $P_e \leq \min(P_1, ET_c)$; P_1 为月降水量, mm; SF 为土壤水分贮存因子, 一般情况下 $SF = 1.0$ 。

直接以月有效降水和作物需水估算灌溉需水量时, 由于忽略了月内降水和作物需水的匹配情况, 得到的灌溉需水量通常较低。对于一般工程规划和水资源分析而言, 以旬为步长进行计算则可以达到相应的精度要求。本文将月有效降水和作物需水随机分配到上中下旬, 估算各个旬的灌溉需水量。和降水相比, 各个旬的

作物需水不会存在很大的差异,例如一个月的降水可能全部集中在某一旬,而作物需水则不会出现这种情况,所以在随机分配时,限制旬作物需水的范围为 $0.33 ET_c(1 \pm 50\%)$ 。

2 结果与分析

2.1 分区与作物面积

根据中国的行政区划,将全国分为东北、华北、西北、华东、中南、西南、华南 7 个区域。根据 SAGE 提供的作物分布数据,获得各区域主要作物的种植面积。需要说明的是,SAGE 提供的作物分布数据是 20 世纪 90 年代的数据,并与农业部门的统计数据存在一定的误差,考虑到本文主要关注作物需水的相对变化,这种误差可以接受。

2.2 气候变化下参考作物腾发量

SRA1B 情景下,中国各地区现状(1961~1990 年 20C3M 情景)和 50 年后(2046~2065 年 SRA1B 情景)参考作物腾发量及其变化幅度见表 1。SRA1B 情景下,参考作物腾发量总体上呈上升的趋势,全国平均增幅约为 8%,作为粮食主产区的东北地区增幅尤为显著。相关性分析表明,参考作物腾发量的增加主要是由温度升高引起的,参考作物腾发量的增加意味着蒸发能力与作物需水量的增加。

2.3 气候变化下作物需水量

棉花、玉米、水稻、小麦 4 种主要作物现状和 50 年后作物需水量变化见表 2,作物需水量变化空间分布见图 1。与参考作物腾发量的变化趋势基本一致,SRA1B 情景下,主要作物的作物需水量均呈增加趋势,以东北地区最为显著。棉花需水量增加显著,尤其

表 1 中国各地区的参考作物腾发量

Table 1 Reference evapotranspirations of each subarea in China

地区	1961~1990 年 20C3M 情景/mm	2046~2065 年 SRA1B 情景/mm	相对增幅 /%
华北	932.3	1012.1	8.56
东北	733.0	821.7	12.10
华东	1067.7	1133.5	6.17
中南	1139.6	1202.1	5.48
西南	617.4	680.0	10.13
西北	789.0	840.8	6.56
华南	1238.0	1308.7	5.71
全国	831.4	896.5	7.83

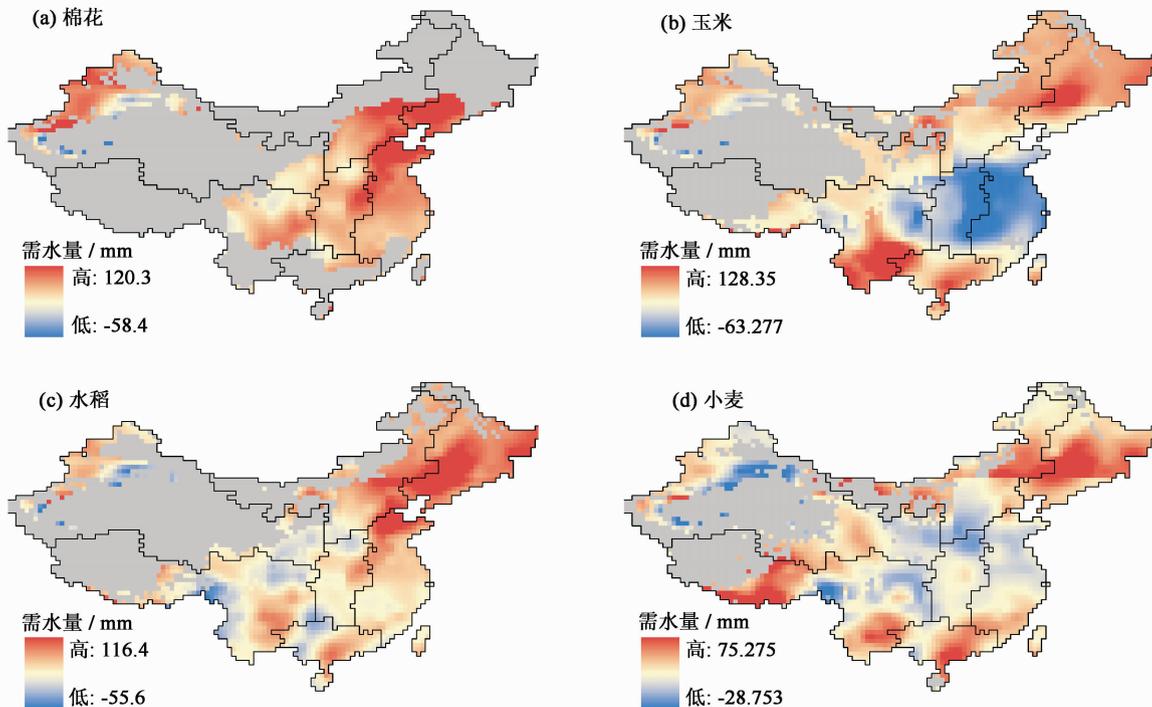


图 1 SRA1B 情景下未来 50 年中国主要作物的作物需水量变化

Fig. 1 Change of crop water demand in SRA1B 2046-2065 in China

是辽宁、河北、山东等省; 玉米需水量在东北呈增加趋势, 长江中下游呈下降趋势; 水稻需水量在河北、辽宁增加显著; 小麦需水量在东北呈增加趋势, 黄河中下游呈下降趋势。由于作物需水量变化主要反映的是作物生育期的参考腾发量变化趋势, 因此表 2 与表 1 存在差异, 如西南地区的年参考作物腾发量增加显著, 但主要作物需水量增加不明显, 华东地区玉米需水量与年参考作物腾发量变化趋势不一致。

表 2 中国各地区主要作物的作物需水量
Table 2 Crop water demand of each subarea in China

作物	华北	东北	华东	中南	西南	西北	华南	全国
1961 ~ 1990 年 20C3M 情景/mm								
棉花	666.2	636.4	770.6	713.6	658.5	634.8	570.0	703.0
玉米	552.9	511.7	715.9	620.7	545.5	513.5	599.8	552.3
水稻	755.3	691.7	832.6	863.6	808.9	692.6	870.4	826.1
小麦	363.0	317.4	388.0	384.5	363.8	305.2	489.9	354.5
2046 ~ 2065 年 SRA1B(增幅)/%								
棉花	6.88	11.49	6.91	5.28	4.23	6.03	4.81	6.36
玉米	5.70	10.30	-3.63	0.08	3.30	3.33	6.41	5.30
水稻	6.71	9.49	3.21	2.89	2.56	2.76	3.00	3.46
小麦	3.68	7.38	0.92	0.87	1.87	2.25	3.48	2.60

2.4 气候变化下灌溉需水量

考虑作物需水与有效降水的随机匹配, 得到 SRA1B 情景下中国各地区主要作物灌溉需水量变化的空间分布(见图 2)以及现状和 50 年后灌溉需水量变化, 见表 3。SRA1B 情景下未来 50 年中国各地区灌溉需水量主要呈增加趋势, 平均增加幅度不大, 其中华南与东北地区增加幅度较大, 西北与中南地区出现下降趋势。究其原因, SRA1B 情景下, 东北与华南降水量减少, 加剧了水资源短缺; 西北与中南地区降水量增加显著, 使灌溉需水量下降。主要作物类型中, 棉花灌溉需水量均呈增加趋势, 以辽宁、河北、山东为甚; 玉米灌溉需水量在东北与华南地区增加显著; 水稻灌溉需水量在东北与华北地区增加显著; 小麦灌溉需水量在东北和华南增加显著。

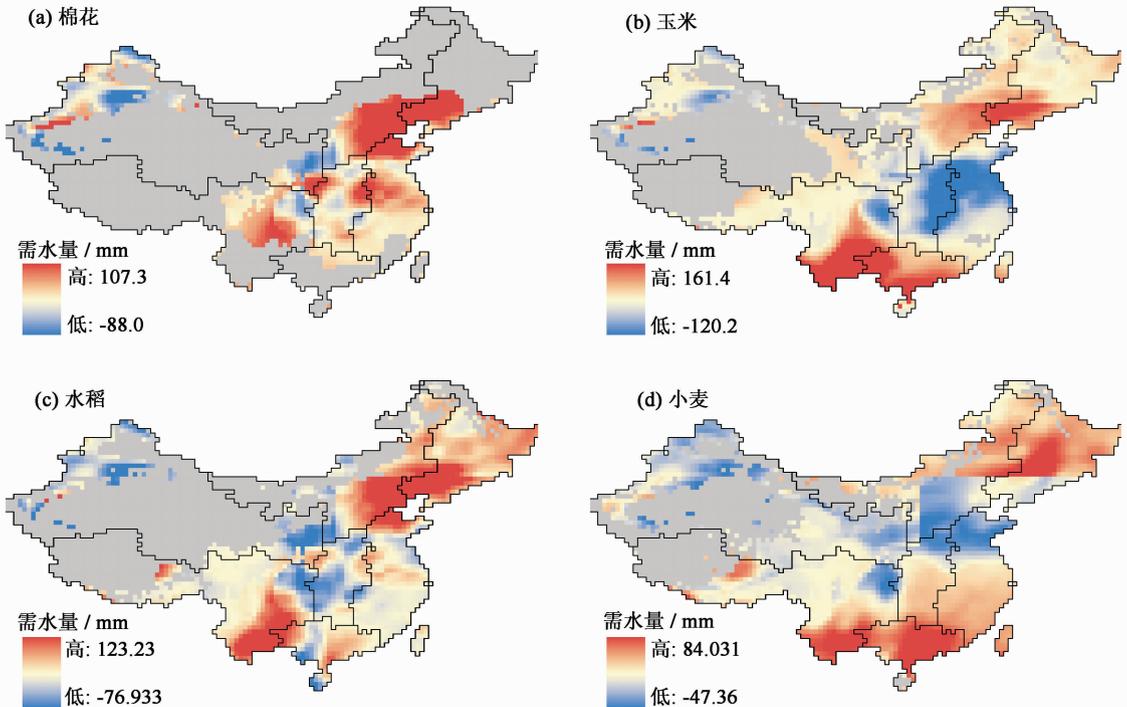


图 2 SRA1B 情景下未来 50 年中国主要作物的灌溉需水量变化

Fig. 2 Change of irrigation requirement in SRA1B 2046 - 2065 in China

表 3 中国各地区主要作物的灌溉需水量

Table 3 Irrigation requirement of each subarea in China

作物	华北	东北	华东	中南	西南	西北	华南	全国
1961 ~ 1990 年 20C3M 情景/mm								
棉花	335.2	245.6	376.4	325.7	297.8	416.4	113.2	364.9
玉米	259.3	193.1	365.1	284.0	191.1	288.8	100.5	225.1
水稻	444.6	350.5	300.1	322.0	404.9	421.1	272.4	322.2
小麦	219.9	167.4	180.4	167.2	192.1	136.3	286.0	180.4
2046 ~ 2065 年 SRA1B(增幅)/%								
棉花	13.45	26.31	6.58	5.05	3.39	-1.09	10.88	5.03
玉米	11.93	16.67	-10.90	-15.45	15.37	-1.30	69.32	9.21
水稻	9.08	12.02	1.60	-2.18	3.75	-1.70	5.20	3.57
小麦	1.51	17.80	-4.12	-2.22	1.74	-5.85	15.62	1.23

3 结 论

采用大气环流模式 MIROC3.2 的输出, 分别计算了 SRA1B 情景下未来 50 年中国各地区的参考作物腾发量、主要作物的作物需水量与灌溉需水量, 通过与现状的对比, 分析了气候变化下中国主要作物的作物需水的演变趋势, 主要结论包括: 受温度升高的影响, 未来参考作物腾发量呈上升趋势, 全国平均增加约 8%; 主要作物的作物需水量呈增加趋势, 东北地区平均增加 10% 左右; 灌溉需水量呈增加趋势, 全国平均增加不明显, 东北与华南增加显著。受气温升高的影响, 参考作物腾发量与作物需水量增加, 降水变化的区域差异导致了灌溉需水量演变规律在不同区域有所不同。

参考文献:

- [1] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 77-82. (LIU Xiao-ying, LIN Er-da. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 77-82. (in Chinese))
- [2] 佟玲, 康绍忠, 粟晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响[J]. 农业工程学报, 2004(2): 15-18. (TONG Ling, KANG Shao-zhong, SU Xiao-ling. Impacts of climate change on reference crop evapotranspiration in Shiyang River basin [J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004(2): 15-18. (in Chinese))
- [3] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [4] FISCHER G, TUBIELLO F N, VAN V H, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990 - 2080[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74: 1083-1107.
- [5] ELGAALI E, GARCIA L A, OJIMA D S, et al. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand[J]. Climate Change, 2007, 84(3/4): 441-461.
- [6] FLEISCHER A, LICHTMAN I, MENDELSON R. Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful? [J]. Ecological Economics, 2008, 65(3): 508-515.
- [7] THOMAS A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60: 306-326
- [8] YANO T, AYDIN M, HARAGUCHI T, et al. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey[J]. Sensors, 2007, 7: 2297-2315.
- [9] DIAZ J A, WEATHERHEAD E K, KNOX J W, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain[J]. Regional Environmental Change, 2007, 7: 149-159.
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

Crop water demand in China under the SRA1B emissions scenario *

CONG Zhen-tao, YAO Ben-zhi, NI Guang-heng

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: Projections of the crop demand under future climate scenarios would help us to understand the potential influence of climate change on food safety and water resources. Using the United Nations Food & Agriculture Organization (FAO) modified Penman-Monteith equation and the output from the Model for interdisciplinary Research on Climate (MIROC3.2) for the SRA1B emissions scenario, the reference evapotranspiration (ET_0) can be calculated for China for the next 50 years. Using the FAO crop coefficients and the Köppen climate classification system, the crop coefficient can thus be determined for every calculation unit. The estimation of crop water demands is achieved using ET_0 and the crop coefficient, and the corresponding irrigation water requirement can also be worked out by matching the effective precipitation with the crop water demand. The result shows that on average, China's ET_0 could increase by about 8%, and so does for the crop water demand and the irrigation water requirement. Over the northeast region, this increase in irrigation water requirement could reach above 10%, and the increase over South China is also significant. The upward trends in water demands are mainly due to the increase in future temperatures, which can result in an increase of ET_0 values. The matter could be further complicated by the reduction of the projected precipitation for the northeast and south regions of China. However, the projected increase in precipitation over the north region could moderate the issue of water demands.

Key words: climate change; crop water demand; irrigation requirement; SRA1B

本刊稿件优先数字出版

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,本刊从 2011 年起,将在印刷版期刊出版的定稿论文在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50979039).