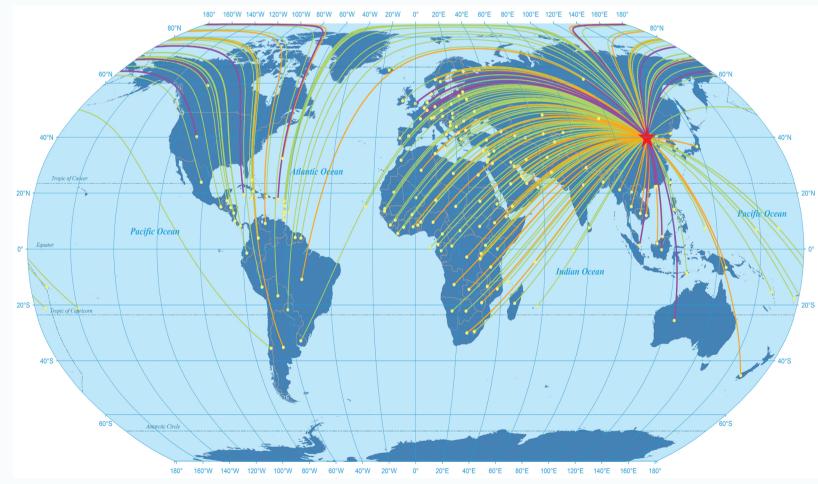




# TROPICAL GEOGRAPHY

第37卷 第4期 Vol.37 No.4

2017



ISSN 1001-5221





广州地理研究所 主办

# 热带地理

第37卷 第4期 2017年7月

#### 目 次

# ・论文・ 中国对外直接投资特征与若干经济地理研究议题——基于中国对全球与东盟的投资分析 …………… 产业转移政策对地区产品结构演化的影响——基于广东省"双转移"政策的实证分析…杨佳意,朱晟君(452) ------WIRUN PHICHAIWONGPHAKDEE( 冯志伟 ), 吴悦芳, 徐红罡( 462 ) 1961-2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征 ...... 贵州静止锋冷区高架雷暴冰雹特征及其成因 ………………………周明飞,万雪丽,罗喜平(484) 蒸发皿蒸发过程中水稳定同位素分馏的实验与模拟 ………华明权, 章新平, 姚天次, 黄 煌, 罗紫东(501) 近 60 年鄱阳湖水情演变特征……………………………………………… 王然丰, 李志萍, 赵贵章, 谭志强, 李云良(512) 湖岸带地下水与湖水作用关系——以鄱阳湖为例 …… 李云良,赵贵章,姚 静,张 奇(522) 中国对非贸易空间格局演变与空间均衡 …………………童瑞凤,任 航,王 鑫,汪 欢,张振克(530) 中国艾滋病疫情分布变化与人口流动性研究 …………………………丁启燕,杨 振,周晴雨(538) 基于 SD 模型的中国 2010-2050 年土地利用变化情景模拟 ...... 全球化-地方性背景下的饮食文化生产: 潮菜原料时空特征 …………………李坚诚(562) ------李 鹏,何琳思,赵 敏,起星艳(569) 广东省城市环境质量变化的时空格局及影响因素 …… 杨江敏,杨 忍,薛德升(601) · 评论 · 广州七星岗古海岸遗迹的发现及其科学意义 ......赵焕庭(610) 再论珠江口伶仃洋开发与治理问题 ……………………………………………李平日,周 晴(620) · 会讯 · 广州七星岗古海岸遗址发现八十周年纪念大会在穗举行 .....(619)

期刊基本参数: CN44-1209/N \* 1980 \* b \* A4 \* 184 \* zh \* P \* ¥24.00 \* 1000 \* 19 \* 2017-07

责任编辑: 李小玲 黄 艳 郭亿华 封面提供者: 黄耿志 陈 聪

Vol.37, No.4

July, 2017

田贺、梁迅、黎夏、刘小平、欧金沛、洪晔、何执兼. 基于 SD 模型的中国 2010-2050 年土地利用变化情景模拟[J]. 热带 地理, 2017, 37 (4): 547-561.

TIAN He, LIANG Xun, LI Xia, LIU Xiaoping, OU Jinpei, HONG Ye, HE Zhijian. Simulating Multiple Land Use Scenarios in China during 2010-2050 Based on System Dynamic Model[J]. Tropical Geography, 2017, 37 (4): 547-561.

# 基于 SD 模型的中国 2010-2050 年 土地利用变化情景模拟

田 贺,梁 迅,黎 夏,刘小平,欧金沛,洪 晔,何执兼 (中山大学 地理科学与规划学院,广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室,广州 510275)

摘 要:通过将中国划分为4个生态区,在综合考虑社会经济和自然因素的前提下,利用系统动力学的原理和方 法,选取对土地利用变化影响最大的驱动因素,分区构建中国土地利用变化系统动力学模型并模拟4种发展情景 下 2050 年中国土地利用变化情况。结果表明:在不同情景设定下,土地利用变化差异较大,其中平稳发展情景 较理想, 生态用地保持良好, 城市扩张较为合理; 建设用地发展给予的压力以及气候条件的不断恶化, 使得 4 种 情景下水域面积在 2045 年前都呈现减少趋势,需要管理者严控城市扩张,提早规划布局以应对相应挑战;气温 和降水对4个牛态区的林地和草地影响程度不同,水域面积主要受到降水影响,而技术进步带来的粮食单产提高 是影响耕地面积变化的重要因素。

关键词:气候变化;土地利用;情景模拟;系统动力学;中国

中图分类号: F301.24; F224 文献标志码: A

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002939

文章编号:1001-5221(2017)04-0547-16

土地利用变化反映了人类在不同时间、空间尺 度上对土地的使用方式,是涉及自然与人文领域诸 多问题的复杂过程,同时也是全球环境变化和可持 续发展研究的热点问题(秦钟等,2009)。土地利 用变化研究对制定区域发展战略,对区域土地利用 结构进行优化配置, 支持土地利用规划和政策的实 施(杨俊等, 2015; 邓辉等, 2013)等方面都具 有重要意义。而采用建立模型的方法对土地利用变 化进行定量分析, 是土地利用变化研究的前沿课题 (汤发树 等, 2007)。国内外学者根据不同的研究目 的,采用不同途径构建了许多土地利用变化模型, 例如线性规划模型、多目标规划模型、灰色模型、 神经网络、Markov模型以及系统动力学模型等(耿 红 等, 2000; Marull et al., 2010; 龚建周 等, 2010; 雷师 等, 2013), 用以了解土地利用变化的驱动因 素及其变化过程,并预测土地利用的未来发展变化

趋势及环境影响。然而这些模型只是采用数理统计 方法探究土地利用变化及其驱动因素之间的外部联 系,不能模拟土地利用变化与多种驱动力之间复杂 的相互影响以及循环反馈的关系(汤发树等, 2007)。研究者们开始尝试采用能描述复杂系统内部 运行机理的系统动力学模型用于土地利用变化研究 中。

系统动力学(System Dynamics, 简称SD)是 以反馈控制理论为基础,以仿真技术为手段通过定 性与定量结合的方式研究复杂系统的行为相互作用 及反馈机制的有效方法。系统动力学模型本质上是 时滞的一阶微分方程,强调对结构的描述,能够处 理具有非线性和时变现象的系统问题,并能对长期、 动态、战略性的定量仿真进行分析与研究(王其藩, 1995)。目前系统动力学几乎涉及人类社会与自然科 学的所有领域(Wolstenholme, 1983; Costanza et al..

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2016-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(41531176、41371376)

作者简介:田贺(1993-),男,安徽人,硕士研究生,主要从事遥感与地理模拟研究,(E-mail)tianhemail@163.com

通信作者:黎夏(1962-),男,广西人,教授,博士生导师,主要从事地理信息科学、元胞自动机与多智能体及遥感应用研究,(E-mail)

1998; Haghani et al., 2003; He et al., 2005; 陈国 卫等,2012)。地理学家将系统动力学模型用于模 拟土地利用变化趋势并取得了较好的结果。如汤发 树等(2007)将SD模型用于小区域土地利用模拟, 分析了3种发展模式下新疆三工河流域的土地利用 变化过程,结果表明SD模型对乡域尺度的土地利用 变化研究是适宜的; 李志等 (2010) 利用SD模型预 测了南京城市边缘区的土地利用变化情况; 李秀霞 等(2013)利用SD-MOP模型预测了2020年吉林省 西部土地利用结构,结果表明,利用SD-MOP整合 模型对吉林省西部土地利用结构进行优化, 使吉林 省西部经济与生态效益得到同步提升。Liu等(2013) 将SD模型整合到SDHPSO-LA模型中模拟出不同情 境下番禺区的土地利用变化,结果表明:该模型能 够在不同尺度上反映土地利用系统的复杂行为; Portela等(2001)利用SD模型模拟了美国大平原地 区的农业过程。还有很多学者利用SD模型结合元胞 自动机等模型大量模拟了多种类型驱动下的土地利 用变化 (He et al., 2006; Han et al., 2009; Lauf et al., 2012)<sub>o</sub>

但目前研究一般只关注市、省级的区域尺度,而将SD模型应用于更大尺度的土地利用变化情景模拟的研究仍比较少,特别是对全国尺度的土地利用变化趋势的研究。中国是世界人口第一大国,国土面积第三大国,在过去近40年中,中国发展速度举世瞩目,一跃成为世界经济总量第二大国。城市化加速且将在未来几十年内持续,由此会引起自然环境和土地利用的变化。在这个前提下研究全国尺度下不同情景的人类活动和气候变化对未来土地利用变化的影响,对制定国家土地管理方案、优化土地资源配置、协调地区发展差异和促进生态、经济和谐发展等方面都将起到非常重要的作用。

另外,随着全球气候变化加剧(IPCC, 2013), 气候等自然因素对土地利用格局产生的影响已经变 得不可忽视(Dale, 1997; Huang et al., 2014)。然 而目前的系统动力学模型基本都是使用社会经济因 素作为驱动力(汤发树等, 2007; 李志等, 2010; 李秀霞 等,2013;许联芳 等,2014),而忽略宏观 气候变化对土地利用格局产生的影响。土地利用变 化是自然和人文因素综合作用的结果,充分考虑自 然作用和人类活动2方面的因素是分析土地利用变 化原因、过程与结果,制定土地利用规划和政策的 前提。因此,本文以中国为研究区,通过建立一个 考虑各种社会经济发展因素以及未来气候变化趋势 的系统动力学模型,用以预测不同情景下的全中国 的土地利用的需求。以期更好地模拟不同情景下的 土地利用变化趋势和规模,为中国土地政策的制定 提供基础和参考。

# 1 研究区域与生态分区

中国位于北半球,亚欧大陆东部,濒临太平洋,领土面积约960万km²,约占全球陆地的1/15。地势西高东低,地形复杂多样、境内河流湖泊众多,气候包括寒温带、暖温带、热带等6个温度带和一个特殊的青藏高寒区,从东到西由湿润的季风过渡到干旱的大陆性气候,景观和气候模式较多。社会经济发展差异较大,经济分布的大致规律是东部沿海地区发达而西部相对落后。为了能更准确地研究中国区域的土地利用需求,根据已有的研究将中国分为不同的生态区进行模拟。

生态区划是指根据主要生态环境因子在不同区域的异质性和相似性,将研究区域划分为不同生态区的过程(Omernik et al., 1997)。2008年环境保护部和中国科学院联合编制发布了《全国生态功能区划》,按照中国的气候和地貌等自然条件,将中国陆地生态系统划分为3个生态大区:东部季风生态大区、西部干旱生态大区和青藏高寒生态大区(环境保护部等,2008);但是该区划对人类活动影响的考虑不够,根据本研究需要,参考谢高地等(2012)的研究结果,并在该研究的基础上,为了确保数据处理和收集的准确性,以保持省(直辖市)域完整为前提,将中国划分为南部湿润生态区、东北部湿润半湿润生态区、北部干旱半干旱生态区和青藏高原生态区(表1、图1)。

#### 表 1 中国生态区划分

Tab.1 Eco-regions of China

生态大区 省份
南部湿润生态区 上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、湖北省、湖南省、广东省、广西壮族自治区、海南省、重庆市、四川省、贵州省、云南省、香港、澳门、台湾省
东北部湿润半湿润生态区 北京市、天津市、河北省、辽宁省、吉林省、黑龙江省、山东省、河南省
北部干旱半干旱生态区 古藏高原生态区 西藏自治区、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区 西藏自治区、青海省

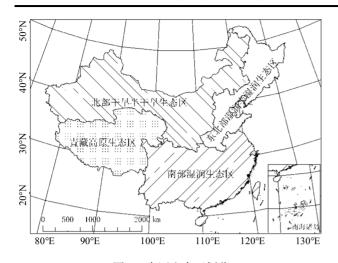


图 1 中国生态区划分

Fig.1 China's ecological regionalization

# 2 模型构建

将所分的4个生态区分别看作一个相对独立的系统,根据区域的特点,将系统动力学模型分为了4个子系统——人口子系统、经济子系统、气候子系统、生产力子系统(图2)。

根据上述的各类驱动因素,经过多次试验,确定各变量变化情况和变量间的数量关系,从而最终确定系统动力学模型(图3、表2)。

系统动力学模拟时间为1995-2050年,时间步长为1 a。1995-2010年为进行模型模拟阶段,在此阶段运用所收集数据对模拟结果进行评估和检查;2011-2050年为土地利用规模模拟阶段。选择2010年数据作为模拟初始值,2011年为情景仿真起始年。

本文所用数据包括1990-2010年的人口、GDP等数据,该数据主要来自于中国统计年鉴(国家统计局,1990-2010)和台湾省统计年鉴(行政院主计总处,1990-2010),数据准确度可信;来自中国科学院遥感环境科学数据中心2000、2005及2010年的30 m分辨率中国土地利用现状产品,该产品已在国家土地资源调查以及生态研究等方面发挥重要作用(刘纪远,1996)。

#### 2.1 人口子系统

人口变化模拟分为2个部分,一部分通过历史统计数据,计算各区域人口变化情况,在不同的模拟情景中设置人口变化率来进行仿真模拟,另一部分使用阻滞人口增长模型进行模拟。

2.1.1 人口高速和低速增长 在人口高速和低速增长的情景下,部分方程列举如下:

$$TP.K = TP.J + PC \times DT$$
 (1)

$$PC = TP.K \times PR$$
 (2)

式中: *TP*代表中国总人口; *PC*代表人口增量; *PR* 代表人口变化率; 尾标*J、K*为时间标志, *J*为过去时刻, *K*为现在时刻; *DT*为差分步长。

根据国务院新闻办公室2000年发表的《中国21世纪人口与发展》白皮书,以及中国第六次人口普查数据,在每个生态区2000-2010年的平均人口增长率的基础上进行1%~2%的调整,设定2050年的人口增长率。

2.1.2 人口中速增长 在人口中速增长的情景下, 采用逻辑斯蒂曲线 (Logistic)模型。Logistic模型 也称为阻滞人口增长模型 (姜启源等, 2003), 是

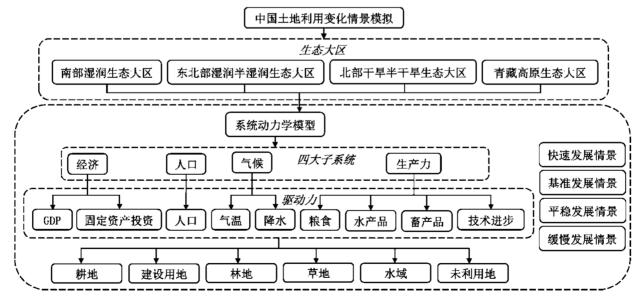


图 2 中国土地利用变化情景模拟

Fig.2 Scenarios simulation of China's land use change

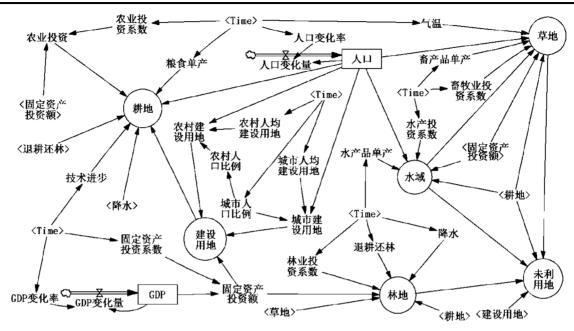


图 3 中国土地利用变化系统动力学模型

Fig.3 China's land use change SD model

#### 表 2 系统动力学流位流率

Tab.2 Level and rate variables of system dynamics model

变量类型	变量名称
流位	人口、GDP、耕地、建设用地、林地、草地、水域、未利用地
流率	人口变化量、GDP 变化量
辅助变量	人口变化率、GDP 变化率、气温、降水、固定资产投资额、固定资产投资系数、林业投资系数、水产投资系数、畜牧业投资系数、农业投资、农业投资系数、农村人口比例、城市人口比例、粮食单产、农村建设用地、城市建设用地、技术进步、退耕还林面积
常数变量	畜产品单产、水产品单产、农村人均建设用地、城市人均建设用地

在马尔萨斯模型的基础上增加了人口容量或极限规模。该模型主要考虑到自然资源、环境条件等对人口增长的阻滞作用,对指数增长模型的基本假设进行修改后得到的。阻滞作用体现在对人口增长率r的影响上,使得r随着人口数量x的增加而下降。若将r表示为x的函数r(x)。则它应为减函数。于是有:

$$\frac{dx}{dt} = r(x), x(0) = x_0 \tag{3}$$

对r(x)的一个最简单的假定是,设r(x)为x的线性函数,即:

$$r(x) = r - sx$$
  $(r > 0, x > 0)$  (4)  
设自然资源和环境条件所能容纳的最大人口数量  $x_m$ , 当 $x = x_m$ 时人口不再增长,即增长率 $r(x_m) = 0$ ,代人式 (4) 得 $s = r/x_m$ ,于是式 (4) 为:

$$r(x) = r(1 - x/x_m) \tag{5}$$

将式(5)代入方程(3)得:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = rx(1 - \frac{x}{x_m}) \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$
 (6)

解方程(6)可得:

$$x(t) = \frac{x_m}{1 + (\frac{x_m}{x_0} - 1) e^{-rt}}$$
 (7)

式中: r为人口增长率; x(t)为t时刻人口数量;  $x_0$ 为初始时刻(t=0)的人口数;  $x_m$ 为自然资源和环境条件所能容纳的最大人口数量。

利用收集的数据,求得4个区域阻滞人口增长模型中的参数,再将参数代人式(5),即可得到稳定增长情景下的人口增长率。

南部湿润生态区、东北部湿润半湿润生态区以及北部干旱半干旱生态区的人口增长率为0.005~0.006,而青藏高原生态区的人口增长率为0.010 2 (表3),这主要是因为根据历年人口变化统计,青藏高原(包括青海省)地区历年增长率较高,同时该生态区的人口基数较少,因此显得人口增长率较高,但实际人口增长并不是很多。

#### 2.2 经济子系统

经济的动态变化中的GDP变化部分方程如下:  $GDP.K = GDP.J + GDPC \times DT$  (8)

#### 表 3 4 个区域阻滞人口增长模型参数

Tab.3 Main parameter values of Logistic growth model

生态大区	人口增长率 r	最大人口数/万人
南部湿润生态区	0.005 5	1 037 425
东北部湿润半湿润生态区	0.005 7	397 682
北部干旱半干旱生态区	0.006 4	177 093.75
青藏高原生态区	0.010 2	55 569.57

#### $GDPC = GDP.K \times GDPR \tag{9}$

式中: GDP代表国内生产总值; GDPC代表GDP变化量; GDPR代表GDP变化率; 尾标J、K为时间标志, J为过去时刻, K为现在时刻; DT为差分步长。中国的经济增长很大程度上依赖于政府的宏

观调控,因此考虑政策因素,在2010年经济增长率的基础上,设置未来经济发展增长率。"十三五规划纲要"对"十三五"期间中国经济的发展作出全面部署。国家统计局的有关课题组采用包括基于HP滤波法和ARIMA模型在内的3个方法和模型对"十三五"时期的经济增长率进行了测算。综合3种预测方法,"十三五"期间(2016—2020)中国经济增长潜在增长率在6.0%~7.5%之间,平均增速为6.8%(盛来运,2015;郑京平等,2016)。根据中国经济增长前沿课题组所做的潜在经济增长情景模拟,2021—2030年中国潜在增长率在5.4%~6.3%之间(中国经济增长前沿课题组,2012)。据此设定4个生态区经济发展高速、平稳及低速增长3种情况(表4)。

#### 表 4 四大生态区不同发展情景参数设置

Tab.4 Main parameter values of different development scenarios of four domains

			*	•				
驱动力		情景	南部湿润生态区	东北部湿润半湿润生态区	北部干旱半干旱生态区	青藏高原生态区		
		高速增长	从 5%e线性增长到 6‰	保持 6‰增长	保持 6‰增长	保持 1%增长		
人口		平稳增长	阻滞人口增长模型	阻滞人口增长模型	阻滞人口增长模型	阻滞人口增长模型		
		低速增长	从 5%c线性回落到 3‰	从 6‰线性回落到 4.5‰	从 6%。线性回落到 4%。	从 1%线性回落到 6‰		
		高速增长	保持 14%	保持 14%	保持 16%	保持 15%		
GDP		平稳增长	从 14%线性下降到 8%	从 14%线性下降到 7%	从 16%线性下降到 7%	从 15%线性下降到 7%		
		低速增长	从 14%线性下降到 5%	从 14%线性下降到 4%	从 16%线性下降到 4%	从 15%线性下降到 4%		
	S1	ATC/ ( °C·a <sup>-1</sup> )	0.081 7	0.056 7	0.065 1	0.068 1		
	51	APC/ $(mm^{\bullet}a^{-1})$	0.697 0	1.225 9	0.835 8	4.076 1		
	S2	ATC/ ( ${}^{\circ}\!\mathrm{C} \cdot \mathrm{a}^{^{-1}}$ )	0.045 2	0.031 4	0.036 1	0.045 1		
卢尼		APC/ $(mm^{\bullet}a^{-1})$	0.477 0	0.839 0	0.572 1	2.948 0		
气候	S3	ATC/ ( °C ⋅a <sup>-1</sup> )	0.068 3	0.047 4	0.054 4	0.068 1		
	53	APC/ $(mm^{\bullet}a^{-1})$	0.659 6	1.160 1	0.791 0	4.076 1		
	S4	ATC/ ( $^{\circ}$ C· $a^{-1}$ )	0.004 4	0.003 0	0.003 5	0.004 4		
	54	APC/ $(mm^{\bullet}a^{-1})$	0.018 8	0.033 1	0.022 6	0.116 2		
		技术进步快		到 2050 年粮食单产比 2010	0年提高 0.7%			
技术进步		技术进步慢		到 2050 年粮食单产比 2010	到 2050 年粮食单产比 2010 年提高 0.3%			
		没有技术进步		保持 2010 年的粮食	保持 2010 年的粮食单产			

通过历史统计数据分别计算固定资产占GDP以及农林牧渔业投资占固定资产投资的比例,根据不同发展情景设置固定资产投资系数和农林牧渔业投资系数(Liu et al., 2013)。固定资产和各类产业的投资比例在一定程度上反映了政府的政策方向,在本系统中将其看作政策调控。

#### 2.3 气候子系统

在本系统中考虑气候因子主要指气温和降水,根据IPCC评估报告(IPCC, 2013),全球气温和降水都处于逐年增加的趋势,全球平均气温到2016—2035年期间相较于1986—2005年,可能增温范围在 $0.3\sim0.7$ ° $^{\circ}$ ° $^{\circ}$ ° $^{\circ}$ 02046—2065年相较于1986—2005年可能增温范围在 $0.4\sim2.6$ ° $^{\circ}$ 0 $^{\circ}$ 0、2013)。其预估的中国降水到2100年每年会增加10%~12%。

基于IPCC排放情景报告(IPCC-SRES)(Core Writing Team et al., 2007),考虑到中国不同区域气温和降水的历史趋势,设置4种情景的气温和降水(图4)。将IPCC-SRES中的B1情景用于S2基准发展情景中,该情景维持当前的气候变化趋势;将IPCC-SRES中的A2情景用于S1快速发展情景,该情景下由于人类的剧烈活动影响,气温和降水均快速增加;将IPCC-SRES中的A1B情景用于S3平稳发展情景,该情景下的气温和降水在4种情景中呈现中等增加趋势;将IPCC-SRES中的Commitment情景用于S4缓慢发展情景中,该情景下气温和降水在以后的40年中会保持平稳状态。根据以上情景设置得到气温和降水的年平均变化,之后采用地区年平均气温和年平均降水作为基准输入温度,进行温度参数设置。

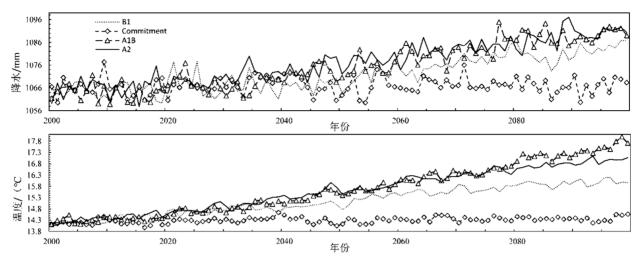


图 4 4种情景全球气温和降水预估

Fig.4 Temperature and precipitation estimates of 4 scenarios

#### 2.4 生产力子系统

生产力子系统主要考虑粮食单产、畜产品单产以及水产品单产。本系统中考虑技术进步带来的粮食单产的提高,并假设畜产品和水产品单产在模拟的时间段内处于相对稳定的状态。本系统主要考虑技术进步快速、技术进步缓慢和没有技术进步3种情景。根据刘玉等(2014)的研究结果,中国粮食的单产从1980—1985年到2006—2010年提高了66%,已经达到了一个较高的水平,因此,基于梁仕莹等(2008)的组合预测模型预测出的中国未来粮食产量,设置不同情景到2050年粮食单产的变化。

### 3 模型检验

#### 3.1 参数灵敏性检验

在模拟之前需要对模型中关键驱动因子进行灵敏性检验,以确定其变化是否能对用地规模产生较大影响。通过回归分析的各参数关系式,利用式(10)进行检验,当S(t)<1时,表明参数灵敏性好(李秀霞等,2013)。本文主要对温度和降水进行灵敏性检验。

$$S(t) = \left| \frac{\Delta Y(t) \cdot Y(t)}{\Delta X(t) \cdot X(t)} \right| \tag{10}$$

式中: S为灵敏度; X为变化参数; Y为输出变量; t代表气温或降水。

经过计算,气温对草地的灵敏度为3.53,降水对林地的灵敏度为1.77,降水对耕地的灵敏度为7.96,因此可以判定气温和降水的微小变化能够对土地利用规模产生影响。

#### 3.2 模型有效性检验

模型有效性校验主要包括理论校验、运行校验和历史仿真校验(许联芳等,2014)。历史仿真校验公式为:

相对误差=
$$\frac{|模拟值-历史值|}{D모0} \times 100\%$$
 (11)

通过理论和运行校验可得出:本模型中所定义的变量关系较为合理,正确反映了真实系统的结构和作用机制,模型运行无异常。本研究以2010年作为历史校验的时间,检验系统动力学模型。

除南部湿润生态区的未利用地外,其他生态区的各类用地相对误差均在9%以内(表5),有4类用地相对误差在1%之内,所有用地的相对误差都在7%左右(表6),因此在整个中国范围内可以认为该模型的模拟结果较好,可以在此模型的基础上进行中国未来土地利用情景的模拟。

# 4 2016-2050年中国土地利用规模模拟

#### 4.1 情景设置

在模型检验阶段对1995-2010年模拟的基础上,通过了解未来中国的人口增长,经济发展等情况,利用已经估算的中国未来气候变化情况以及中国土地利用的政策规定,设置人口、GDP以及气温降水等不同变化情况组合,建立4种发展模拟情景(表7)。

根据表7的情景设置,分区域进行模拟。首先输入人口、GDP、气温、降水和技术进步等驱动因

#### 表 5 四大生态区系统动力学土地利用模拟历史校验结果

Tab.5 His	storical test	data o	of land	demand	of four	domains
-----------	---------------	--------	---------	--------	---------	---------

 $km^2$ 

区域	数据	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
	真实数据	622 067.0	421 260.0	96 943.0	40 525.0	96 130.0	50 859.0
东北部湿润半湿润生态区	模拟结果	632 524.0	414 508.0	89 098.1	38 301.0	103 824.0	46 445.1
	相对误差	0.016 81	0.016 03	0.080 92	0.054 88	0.080 04	0.086 79
	真实数据	768 528.0	1 329 634.0	368 450.0	78 572.0	86 535.0	21 241.0
南部湿润生态区	模拟结果	768 593.0	1 327 090.0	371 300.0	78 007.3	86 780.7	14 957.1
	相对误差	0.000 08	0.001 91	0.007 74	0.007 19	0.002 84	0.295 84
	真实数据	418 767.0	344 064.0	1 239 804.0	54 566.0	36 988.0	1 507 270.0
北部干旱半干旱生态区	模拟结果	418 391.0	343 557.0	1 241 610.0	55 752.0	36 791.7	1 629 600.0
	相对误差	0.000 90	0.001 47	0.001 46	0.021 74	0.005 31	0.081 16
	真实数据	16 779.0	194 775.0	955 515.0	107 111.0	1 733.0	642 413.0
青藏高原生态区	模拟结果	16 779.4	195 132.0	956 414.0	107 176.0	1 733.1	673 067.0
	相对误差	0.000 02	0.001 83	0.000 94	0.000 61	0.000 03	0.047 72

表 6 中国系统动力学土地利用模拟历史校验结果

Tab.6	Historical test data	of land demand of C	China km <sup>2</sup>
数据	真实数据	模拟结果	相对误差
耕地	1 826 141.0	1 836 287.4	0.005 6
林地	2 289 733.0	2 280 287.0	0.004 1
草地	2 660 712.0	2 658 422.1	0.000 9
水域	280 774.0	279 236.3	0.005 5
建设用地	221 386.0	229 129.5	0.035 0
未利用地	2 221 783 0	2 364 069 2	0.064.0

素的变化参数。之后利用收集的历史统计数据和土地利用数据对各类驱动因子和土地利用规模进行多

项式回归拟合,并输入到SD系统中。由于各生态区的4种情景回归公式基本相同,通过表4中的变量设置达到不同情景设置的目的,因此本文仅列出4个生态区S1快速发展情景下的拟合公式,详见文后附录。

#### 4.2 系统模拟结果

- 4.2.1 四大生态区模拟结果 见图5。
- 4.2.2 中国土地利用变化模拟结果 根据上述的参数设置,在模型中进行各种情景的模拟,结果见图6。

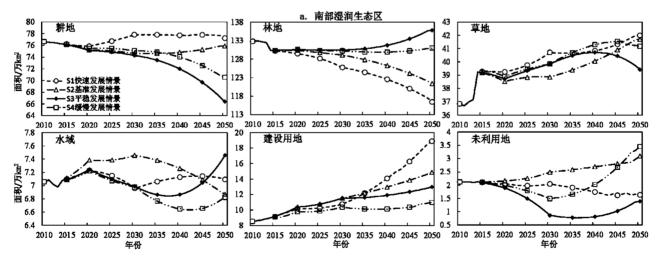
#### 4.3 结果分析

4.3.1 中国土地利用变化模拟结果分析 1)在快速发展情景S1中,人口高速增长,GDP增加迅速,技

表 7 中国土地利用变化情景

Tab.7 Different development scenarios of China

情景	情景设置
S1 快速发展情景	高人口增长,高 GDP 增长,技术进步迅速,IPCC-SRES A2 情景
S2 基准发展情景	中人口增长,中 GDP 增长,技术进步缓慢,IPCC-SRES B1 情景
S3 平稳发展情景	低人口增长,中 GDP 增长,技术进步迅速,IPCC-SRES A1B 情景
S4 缓慢发展情景	低人口增长,低 GDP 增长,没有技术进步,IPCC-SRES Commitment 情景



(转下页)

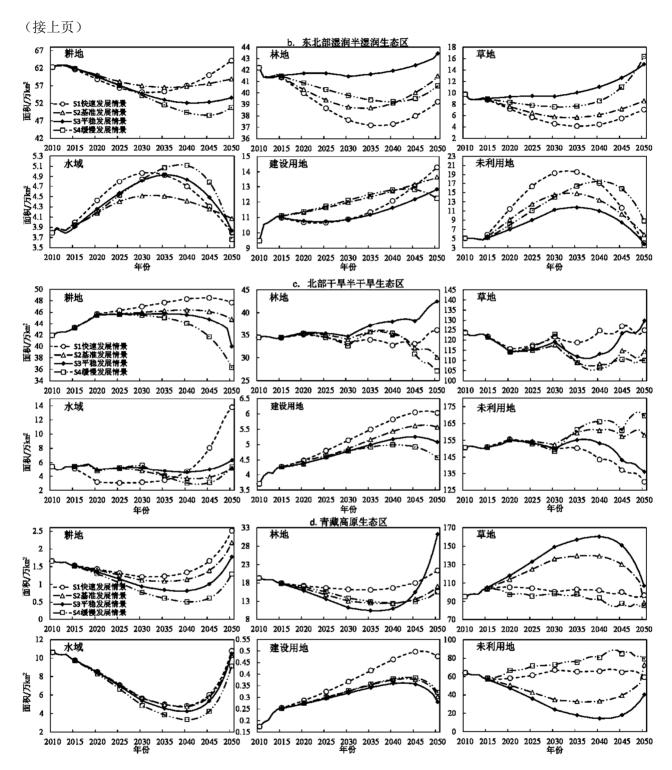


图 5 四大生态区土地利用变化情景模拟结果 Fig.5 Land use scenarios simulation of four domains

术进步快,气温增加缓慢,降水增加较快。未来50年,中国的建设用地和耕地都处于增加的趋势,到2050年分别比2010年增加了81.4%和4.9%。建设用

地持续增加的主要原因是人口的迅速增长,而由于 技术进步速度较快,粮食单产提高较多,所以耕地 总面积变化不大。建设用地在2010—2020年间增长

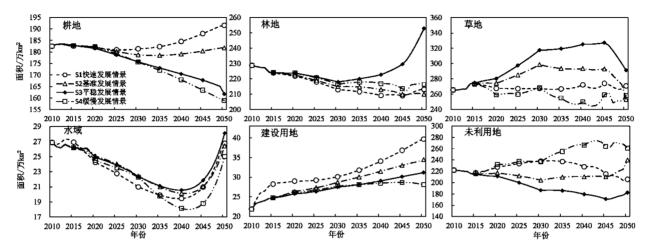


图 6 中国土地利用变化情景模拟结果

Fig.6 scenarios' simulation results of China's land use change

较快,中间10年放缓,2040年后增长较为迅速。建设用地和耕地的持续扩张主要侵占了水域和林地,压缩水域面积,使得其在2040年左右跌到最低水平,之后有所回升。草地的变化幅度不大,2050年比2010年分别增加了1.9%,一直处于平稳波动的状态。未利用地经历了先增加后减少的过程,主要受到其他用地类型发展的影响,2050年比2010年减少了7.4%,在该情景下,城市不断扩张,耕地增长平稳,生态用地略有减少,城市发展过快。管理者应该着重控制城市发展方向,加大林地等生态用地的投资和保护力度,尽量控制建设用地对生态用地的侵占。

2)在基准发展情景S2中,人口和GDP中速增长, 气温和降水增加平稳,技术进步缓慢。建设用地面 积基本呈现线性增长,这是由于阻滞人口模型在此 阶段基本处于线性增长的状态。到2050年建设用地 面积比2010年增加57.5%。耕地面积基本处于平稳 波动状态,2035年之前面积逐渐缩小,之后有所回 升,2050年比2010年减少0.38%,基本可以认为没 有变化。另外由于气温的升高,以及建设用地的扩 张,对生态环境有所破坏,林地和草地的面积在2050 年分别比2010年减少了8.22%和4.6%,还有部分林 地和草地退化为未利用地。此外,多种环境的影响 导致水域面积不断缩小,在约2045年开始有所回升, 2050年比2010年减少1.6%。在该情景下城市和耕地 增长平稳,生态用地维持较好,整体发展较为合理, 管理者需要加强对林地和水产业的保护和投资。

3)在平稳发展情景S3中,人口和GDP低速增长, 气温增加缓慢,降水增加较快且技术有较大进步。 建设用地增长缓慢,2050年比2010年增加了42.5%。 由于技术进步,粮食单产提高较多且人口增长缓慢, 出现粮食过剩,故耕地面积持续缩减,2050年比2010 年缩小了11.4%。水域也出现面积先减少后增加的 情况,2050年比2010年面积增加了4.6%,是4种情 景中唯一有所增加的情景。耕地面积的缩小和建设 用地面积的缓慢增加使得生态发展良好,林地和草 地面积都有所增加。其中,林地面积先减少,2040 年左右较快增加,2050年比2010年增加了10.5%。 草地在2045年以前缓慢增加,之后有所减少,2050 年比2010年增加了9.7%。本情景下生态发展良好, 人民消费水平增加,生态环境得到保护和发展,土 地利用较为合理。

4)在缓慢发展情景S4中,人口和GDP低速增长, 气温增加迅速,降水增加缓慢,技术没有进步。建 设用地先增长,到2045年左右出现下降趋势,这和 人口的发展情况有很大关系,考虑到中国的人口现 状,人口增长率低的情况下中国人口老龄化加重, 2050年的建设用地比2010年增加了28.6%, 为4种情 景最低。耕地也持续减少,2050年比2010年减少了 12.9%, 人口老龄化及气候的恶化导致耕地减少, 可能粮食不能自给,需要更多的进口来满足粮食需 求。草地和林地面积不断波动,但整体处于减少状 态,草地2050年比2010年减少了2.8%,林地减少了 5.4%。由于气温增加迅速,降水增幅小,水域面积 大幅缩减,2050年比2010年减少了6.9%,为4种情 景中最小。林地草地等生态用地退化为未利用地, 导致2050年未利用地面积比2010年增加了17.6%。 该情景城市发展缓慢,生态退化较为严重,在气候 的影响下,管理者应实行更加积极的人口政策,加 大生态方面的管理和投资,维持生态环境平稳发展。 4.3.2 气候因子影响作用分析 本研究中的各类土 地规模预测公式,是通过各种驱动因子进行多项式 回归得到的,能够很好地表达驱动因子之间以及驱 动因子和用地规模之间的复杂作用。因此,本文根 据所设置的气候变化情景,分别计算在气温变化 0.01℃,降水变化1 mm的情况下,水域、草地、林 地以及耕地四类生态用地的变化率,分析气候因子 对各个生态区土地利用的影响(图7)。

1)情景S4的气温和降水对青藏高原地区的土地利用影响程度最大,说明在技术没有进步,以及人口和经济增长缓慢的情况下,气候仍是影响生态用地的重要驱动因子。在该种情景下,需要做好应对气候变化带来的挑战。在情景S1中,技术进步最快,

降水和气温对耕地所产生的影响为4种情景最小,气温每上升0.01℃,耕地面积变化0.000 2‰,降水每增加1 mm,耕地面积变化0.358‰。这说明技术进步能够有效抑制气候变化带来的耕地面积缩减,提高技术是维持粮食产量和耕地面积的重要途径。在青藏高原地区,降水对于林地和草地等的影响占据主导地位。

2)东北部湿润半湿润生态区中耕地受到降水的影响比较大,其中在S4情景中,人口和GDP低速增长,没有技术进步的情况下,耕地面积受到气候的影响程度更大。气温变化0.01℃,林地变化最大为0.0383‰,降水变化1 mm,林地变化最大为0.026‰。在东北湿润半湿润生态区,气温对于草地的影响远远大于降水所产生的影响,因此可以认为气温是该

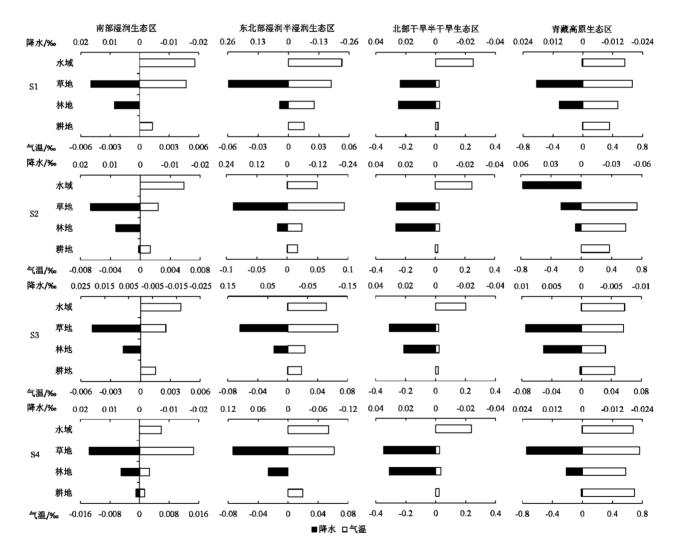


图 7 气温降水影响

Fig.7 The Effect of temperature and precipitation

区域草地变化的主导因素;水域变化的主导因素为降水,4种情景变化程度差别不大。

- 3)南部湿润生态区气温变化0.01℃,草地变化率在0.017‰~0.020‰,降水每变化1 mm,草地变化率在0.002‰~0.015‰,气温变化同时也会带来林地面积的改变,而降水则对林地面积没有较大影响,因此可以认为气温是影响林地和草地变化的主要因子。水域受到降水的影响较大,在生态环境较差的情景S4中,水域受到最大影响,变化了0.005 9‰。在技术进步最快的S1和S3情景中,影响耕地面积的主要是降水,在技术进步较慢的S4情景中,气温和降水对耕地面积都有较为明显的影响,因此可以看出技术进步对耕地面积变化的影响仍占据主要地位。
- 4)北部干旱半干旱生态区4种情景的降水对4类用地都有较为显著影响,这与该生态区缺水的自然条件也较为吻合,其中降水每变化1 mm,水域变化在0.2%~0.25%。,S1情景所受影响最大;情景S4中耕地受降水影响最大达0.022%。,S1中受到影响最小为0.17%。。气温和降水的变化对林地和草地的影响都在0.02%~0.04%。,在该生态区林地和草地主要受到2种气候因子的共同影响。

# 5 结论与讨论

- 1)系统动力学进行土地利用情景模拟的主要驱动因素是人口、经济、投资和技术等社会因素。本文在前人研究的基础上特别加入气温和降水等自然因素驱动因子,并将其用在大尺度的土地利用情景模拟中。利用本模型对中国1995-2010年的土地利用进行模拟,结果显示有4类用地模拟相对误差在1%之内,其他用地的模拟相对误差都在7%以内,且气温和降水的敏感性较好,因此该模型能用来进行中国土地利用的情景模拟。
- 2)系统动力学能够模拟不同情景下2010-2050 年的土地利用变化特征,模拟结果显示:在气温缓慢上升和降水持续增加的情况下,包括草地林地在内的生态用地面积增大,生态环境得到改善。4种情景中除生态环境最好的S3情景,其余情景水域面积都减少,这与全球气温持续增长以及建设用地和耕地的扩张有很大关系。
- 3)气候因子在不同生态区对水域、草地、林地以及耕地4种用地有着不同的影响程度。通过分析可以得到:在青藏高原地区,降水对于林地和草地等的影响占据主导地位;在东北部湿润半湿润生态区,

气温为草地变化的主要驱动因子;在南部湿润生态区,气温是影响林地和草地变化的主要因子;在北部干旱半干旱生态区,4种用地的主要影响因子都为降水,同时林地和草地还受到气温的共同影响。在四大生态区中,降水仍是影响水域面积的主要因子,目技术进步对耕地面积的影响仍占据主要地位。

技术进步提高了粮食单产,能够有效缓解人口 增长粮食需求增多导致的耕地需求激增。通过对农 业投资的控制,政府能够有效控制耕地的保有量。

- 4)根据《全国土地利用总体规划纲要(2006-2020年)》, 到2020年耕地保持在12 033.33万 hm<sup>2</sup> (18.05亿亩), 但从2007年开始的第二次全国土地调 查结果显示2009年中国耕地面积为13 538.5万hm<sup>2</sup> (20.31亿亩), 第二次调查的数据更加全面、客观、 准确(国家资源部等,2013)。本文进行的中国土 地利用模拟结果显示: 4种情景的耕地面积都在20 亿亩以上,其中快速发展情景S1,到2050年耕地比 2010年有所增加。其余3种情景耕地都有所减少,缓 慢发展情景S4中耕地减少最多,2050年比2010年减 少了12.9%,这说明在气候不断恶化的情况下,要 对有可能发生的耕地退化加以预防。《纲要》中指出 建设用地总面积在2020年控制在3 724万hm²(55 860 万亩)以内,2020年比2010年新增建设用地390万hm<sup>2</sup> (5 850万亩)。本文预测结果显示:4种情景下建设 用地面积均在3 724万hm²以内, S1情景建设用地面 积为最大,增量也最大,2020比2010年增加621.16 万hm<sup>2</sup>, 这说明在人口高速增长情况下, 需要对建设 用地扩张加以控制。
- 5)系统中的各类投资是政府政策调控的间接 表示,通过水产投资、畜牧投资和林业投资等,能 够有效地调节土地利用规模,使得土地资源不会向 单一的土地利用类型过度发展。因此,本文构建的 综合人文和自然驱动因素的系统动力学模型,能够 很好地模拟土地利用系统各个驱动力之间的复杂行 为关系,能够模拟不同条件下的土地发展规模和趋 势,可为土地利用规划和政策调控提供有效的参考。
- 6)本文所进行的气候因子对4类用地的影响分析虽然不能够完全代表自然条件下气温和降水对土地利用规模的影响,但是基于本研究所构建的SD模型,能在一定程度上反映出气候变化对各类用地的影响以及各类土地利用类型之间的相互作用,能够较好地模拟土地利用变化趋势和规模,为土地资源配置和决策提供依据和参考。

#### 参考文献 (References):

- Core Writing Team, PACHAURI R K, REISINGER A. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104.
- 陈国卫,金家善, 耿俊豹, 2012. 系统动力学应用研究综述. 控制工程, 19(6): 921-928. [CHEN Guowei, JIN Jiashan, Geng Junbao, 2012. Control Engineering of China, 19(6): 921-928. ]
- DALE Virginia H, 1997. The Relationship Between Land-Use Change and Climate Change. Inferential Studies of Climate Change, 7 (3): 753-769.
- 邓辉,何政伟,陈晔,蔡宏,2013. 四川盆地大都市边缘区土地利用时空格局模拟——以资阳市雁江区为例. 地理科学,33 (12): 1524-1530. [DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, CAI Hong, 2013. The Land Use Spatio-temporal Pattern Simulation in Metropolitan Fringe of the Sichuan Basin: A Case Study in Yanjian District, Ziyang City, Sichuan. Scientia Geographica Sinica, 33 (12): 1524-1530. ]
- 耿红,王泽民,2000. 基于灰色线性规划的土地利用结构优化研究. 武汉测绘科技大学学报,25(2):167-182. [GENG Hong, WANG Zemin,2000. Research on Optimization of Land Use Structure Based on Gray Linear Programming. Journal of Whan Technical University of Surveying and Mapping, 25(2): 167-182.]
- 国家统计局, 1990-2010. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版 社. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, 1990-2010. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press.]
- 龚建周, 刘彦随, 张灵, 2010. 广州市土地利用结构优化配置及其潜力. 地理学报, 65(11): 1391-1400. [GONG Jianzhou, LIU Yansui, ZHANG Ling, 2010. The Optimal Allocation of Land Use and Its Potential Appraisal in Guangzhou City. Acta Geographica Sinica, 65(11): 1391-1400. ]
- 国家资源部,国家统计局,国务院第二次全国土地调查领导小组办公室, 2013. 关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报 [EB/OL]. [2013-12-30]. http: www.mlr.gov.cn.zwgk.zytz.201312. t20131230\_1298865.htm. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, The State Council's second national land survey leading group office, 2013. A bulletin on the results of the second national land survey[EB/OL]. [2013-12-30]. http://www.mlr. gov.cn.zwgk.zytz.201312.t20131230\_1298865.htm.]
- HAGHANI Ali, LEE Sang Y, BYUN Joon H, 2003. A system dynamics approach to land use transportation system performance modeling part I: methodology. Journal of Advanced Transportation, 37: 1-41.
- HAN Ji, Hayashi Yoshitsugu, CAO Xin, Imura Hidefumi, 2009. Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China. Landscape and Urban Planning, 91: 133-141.
- HE Chunyang, PAN Yaozhong, SHI Peijun, LI Xiaobing, CHEN Jin, LI Yuechen, LI Jinggang, 2005. Developing land use scenario dynamics model by the integration of system dynamics model and cellular automata model. Science in China Series D: Earth Sciences, 48: 1979-

1989.

- HE Chunyang, Norio Okada, ZHANG Qiaofeng, SHI Peijun, ZHANG Jingshui, 2006. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamics model in Beijing, China. Applied Geography, 26: 323-345.
- HUANG Qingxu, HE Chunyang, LIU Zhifeng, SHI Peijun, 2014. Modeling the impacts of drying trend scenarios on land systems in northern China using an integrated SD and CA model. Science China Earth Sciences, 57: 839-854.
- 环境保护部,中国科学院, 2008. 全国生态功能区划[EB/OL]. [2008-07-18]. http://www.mep.gov.cn.gkml.hbb.bgg.200910.W02008080143623 7505174.pdf. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences. 2008. China's Ecological Regionalization[EB/OL]. [2008-07-18]. http://www.mep.gov.cn.gkml.hbb.bgg.200910.W020080801436237505174.pdf.]
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 159–254.
- MARULL Joan, PINO Joan, TELLO Enric, CORDOBILLA María José, 2010. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona Metropolitan Region. Land Use Policy, 27 (2): 497-510. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.07.004.
- 姜启源,谢金星,叶俊,2003. 数学模型. 北京:高等教育出版社, 12-15. [JIANG Qiyuan, XIE Jinxing, YE Jun, 2003. Mathematical Model. Beijing: Higher Education Press, 12-15.]
- LAUF S, HAASE D, HOSTERT P, LAKES T, KLEINSCHMIT B, 2012. Uncovering land-use dynamics driven by human decision-making e A combined model approach using cellular automata and system dynamics. Environmental Modelling&Software, 27/28: 71-82.
- LIU Xiaoping, OU Jinpei, LI Xia, AI Bin, 2013. Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation. Ecological Modelling, 257: 11-14.
- 雷师,全斌,欧阳鸿,白一君,谢金宁,2013. 基于Markov模型的长沙市和泉州市土地利用变化预测及对比研究. 水土保持研究,20(6):224-229. [LEI Shi, QUAN Bin, OU YANG Hong, BAI Yijun, XIE Jinning, 2013. Prediction and comparison of the land use changes in Changsha City and Quanzhou City based on Markov model. Research of Soil and Water Conservation, 20(6): 224-229. ]
- 李秀霞,徐龙,江恩赐,2013. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化. 农业工程学报,29 (16): 247-255. [LI Xiuxia, XU Long, Jiang En'ci, 2013. Multi-objective optimization of land use structure in western Jilin province based on system dynamics. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29 (16): 247-255.]
- 李志,周生路,陆长林,李达,王晓瑞,2010. 基于系统动力学城市边缘区土地利用变化模拟与预测——以南京市江宁区为例. 土壤,42(2):314-318. [LI Zhi, ZHOU Shenglu, LU Changlin, WANG Xiaorui,2010. Simulation and Prediction of Land-Use Change in Urban Marginal Zone Based on System Dynamics Model. Soils, 42(2):314-318. ]
- 梁仕莹, 孙东升, 杨秀平, 刘合光, 2008. 2008-2020年我国粮食产量

- 的预测分析. 农业经济问题, S1: 132-140. [LIANG Shiying, SUN Dongsheng, YANG Xiuping, LIU Heguang, 2008. Forecast and Analysis of Grain Yield in China from 2008 to 2020. Issues in Agricultural Economy, S1: 132-140.]
- 刘纪远, 1996. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京:中国科学技术出版社. [LIU Jiyuan, 1996. Macro-scale Survey and dynamic study of natural resources and environment of china by remote sensing. Beijing: China Science and Technology Press.]
- 刘玉,高秉博,潘瑜春,郜允兵,2014. 基于LMDI模型的中国粮食产量变化及作物构成分解研究. 自然资源学报,29(10): 1709-1720. [LIU Yu, GAO Bingbo, PAN Yuchun, GAO Yunbing,2014. Investigating Contribution Factors to China's Grain Output Increase Based on LMDI Model During the Period 1980 to 2010. Journal of Natural Resources, 29(10): 1709-1720.]
- OMERNIK Janmes M, BAILEY Robert G, 1997. Distinguishing between watersheds and ecoregions. Journal of American Water Resources Association, 33 (5): 935-949.
- PORTELA Rosimeiry, RADEMACHER Ida, 2001. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. Ecological Modelling, 143: 115-146.
- 秦钟,章家恩,骆世明,吴志峰,2009. 基于系统动力学的土地利用变化研究. 华南农业大学学报,30(1): 89-93. [QIN Zhong, ZHANG Jiaen, LUO Shiming, WU Zhifeng, 2009. Study on the trend of land use based on system dynamics. Journal of South China Agricultural University, 30(1): 89-93.]
- COSTANZA Robert, RUTH Matthias, 1998. Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. Environmental Management, 22 (2): 183-195.
- 沈永平,王国亚, 2013. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 35 (5): 1068-1076. [SHEN Yongping, Wang Guoya, 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report. Journal of Glaciology and Grocryology, 35 (5): 1068-1076. ]
- 盛来运, 2015. 新常态新动力——十三五经济增长动力机制研究. 北京: 中国统计出版社. [SHENG Laiyun, 2015. A Study on the Motive Mechanism of Economic Growth in the Thirteen Five-year Plan. Beijing: China Statics Press.]
- 汤发树,陈曦,罗格平,蔺卿,李照杰,赫静,2007. 新疆三工河绿洲 土地利用变化系统动力学仿真. 中国沙漠,27(4):594-599. [TANG

- Fashu, CHEN Xi, LUO Geping, LIN Qing, LI Zhaojie, HE Jing, 2007. Simulation on Landuse Change in Sangonghe Oasis of Xinjiang by System Dynamics. Journal of Desert Research, 27 (4): 594-599.
- WOLSTENHOLME E F, 1983. Modelling National Development Programmes-An Exercise in System Description and Qualitative Analysis Using System Dynamics. Journal of the Operational Research Society, 34: 1133-1148.
- 王其藩,1995. 系统动力学. 北京:清华大学出版社,12-22. [WANG Qifan, 1995. System Dynamics. Beijing: Tsinghua University Press, 12-22.]
- 谢高地,张昌顺,张林波,苏德,曹淑艳,冷允法,肖玉,2012. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. 自然资源学报,27(1): 154-162. [XIE Gaodi, ZHANG Changshun, ZHANG Linbo, SU De, CAO Shuyan, LENG Yunfa, XIAO Yu, 2012. China's county-scale ecological regionalization. Journal of Natural Resources, 27(1): 154-162. ]
- 行政院主计总处, 1990—2010. 统计年鉴. 台北: 行政院主计总处. (台湾) [Directorate-General of Budget, Accounting and Statistics, Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan), 1990-2010. Statistical Yearbook of the Republic of China. Taipei: Directorate-General of Budget, Accounting and Statistics, Executive Yuan, R.O.C. (Taiwan).
- 许联芳, 张建新, 陈坤, 肖莉, 邢旭东, 2014. 基于SD模型的湖南省土 地利用变化情景模拟. 热带地理, 34(6): 859-867. [XU Lianfang, ZHANG Jianxin, CHEN Kun, XIAO Li, XING Xudong. Land use change scenarios simulation in Hunan province based on the SD model. Tropical Geography, 34(6): 859-867.]
- 杨俊,解鹏,席建超,葛全胜,李雪铭,马占东,2015. 基于元胞自动 机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例. 地理 学报,70(3): 461-475. [YANG Jun, XIE Peng, XI Jianchao, GE Quansheng, LI Xueming, MA Zhandong, 2015. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: A case study of Dalian Economic and Technological Development Zone. Acta Geographica Sinica, 70(3): 461-475. ]
- 郑京平,刘爱华,郑泽香, 2016. "十三五"时期中国经济展望. 统计研究,33(5):13-22. [ZHENG Jingping,LIU Aihua, ZHENG Zexiang, 2016. Prospects of China's economic during "the 13th Five-Year Plan" Deniod. Statistical Research, 33(5): 13-22.]
- 中国经济增长前沿课题组,2012. 中国经济长期增长路径、效率与潜在增长水平. 经济研究,(11): 4-17. [Research Group on China's Economic Growth,2012. China's Long-Term Growth Path, Efficiency, and Potential Growth Rate. Economic Research Journal,(11): 4-17.]

# Simulating Multiple Land Use Scenarios in China during 2010-2050 Based on System Dynamic Model

TIAN He, LIANG Xun, LI Xia, LIU Xiaoping, OU Jinpei, HONG Ye, HE Zhijian

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** China is going through a rapid urbanization process, which will have significant influences on the land use pattern in the nationwide scale. In this context, it is very important for getting more information about the overall trend of land use change in the coming decades. To help develop better land management policies and improve the land resource allocation, this paper provides a system dynamic model which is able to project future demands of multiple land use types under the influences of various climate change and socioeconomic factors (e.g. population, gross domestic product, investment) for large scale region in different scenarios. The developed SD model consists of four sub-modules: the population sub-module, the economy sub-module, the climate sub-module and the productivity sub-module. Meanwhile, four regions (the northeast humid and semi-humid region, the northern arid and semi-arid region, the southern humid region and the Tibet Plateau region) were designated based on China's provincial boundary according to the regional natural ecological conditions and socio-economic development. The model is applied in mainland China to simulate future land use demands under four different scenarios from 2015 to 2050 (the fast development scenario, the baseline development scenario, the harmonious development scenario, the slow development scenario). These scenarios are developed based on future temperature and precipitation data provided by the IPCC assessment reports. The simulation results show that our newly developed SD model is able to effectively simulate long term land use change under different land use scenarios. The analysis results demonstrate that the demand for each land use type, especially the construction land and cultivated land, will vary greatly in different land use scenarios. The demand for construction land will grow in four scenarios, especially in the fast development scenario. The future demand for cultivated land will be relatively low in the baseline development scenario and the slow development scenario. In addition, the harmonious development scenario is the healthiest, which successfully keeps more ecological land than other scenarios. Besides, because of the climate change and construction land increment, the amount of water area tends to decrease in all four scenarios from 2015 to 2045. Therefore, managers should strictly control the city expansion to meet the challenges from the reduction of the water stores. The impacts of temperature and precipitation on forestland and grassland are different in the four regions. In southern humid region, areas of forest land and grassland are mainly affected by temperature. In northeast humid and semi-humid region, temperature is also the key factor for area change of grassland. In northern arid and semi-arid region, most land use types are mainly affected by precipitation while the effects of temperature on forestland and grassland cannot be ignored. In the Tibet Plateau region, forestland and grassland areas are mainly affected by precipitation. The cultivated land areas in four scenarios are more than 2 billion mu. It shows an increase from 2010 to 2050 in the fast development scenario but decreases in the other three scenarios. Especially, in the slow development scenario, the cultivated land area in 2050 will be 12.9% lower than that in 2010. This indicates that if future climate is deteriorating, it will be necessary for managers to take measures to protect cultivated land from degradation. Moreover our analysis results also indicate that the improvement of technology is also an important factor for affecting the amount of cultivated land.

**Key words:** climate change; land use; scenario simulation; system dynamics; China

# 附录

## 1 四生态区拟合公式

#### 1.1 东北部湿润半湿润生态区土地利用情景模拟拟合公式:

$$AL = 1.4 \times 10^6 + 8.6 \times IA - 0.3 \times AR + 9.5 \times Pre + 1.4 \times CL - 2.4 \times 10^{-3} \times Pop + 3.2 \times 10^4 \times (GP \times Tec)$$
 (1)

$$CL = 1.1 \times 10^5 + 1.8 \times UL - 1.3 \times RL - 1.3 \times 10^{-2} \times IFD$$
 (2)

$$WL = 1.9 \times 10^{5} - 4.3 \times 10^{3} \times FP - 7.7 \times 10^{-5} \times Pop - 0.6 \times AL \times (PA \times IFD) - 0.2 \times AL$$
 (3)

$$FL = 3.5 \times 10^{5} - 2.0 \times Pre - 0.8 \times IFD \times PF + 0.1 \times AR - 8.8 \times 10^{-3} \times AL + 0.8 \times GL$$
 (4)

$$GL = 13.3 \times WL + 2.1 \times AL + 1.8 \times 10^{3} - 1.5 \times 10^{-4} \times SP \times Pop + 21.9 \times IFD \times PS - 1.7 \times 10^{6}$$
(5)

$$UnL = ConsA - AL - CL - WL - FL - GL \tag{6}$$

#### 1.2 南部湿润生态区土地利用情景模拟拟合公式

$$AL = 8.5 \times 10^{5} - 1.1 \times Pre + 0.1 \times AR - 0.2 \times IA - 2 \times 10^{-5} \times (GP \times Pop \times Tec) - 3396$$
 (7)

$$CL = 8.8 \times 10^4 - 0.1 \times RL + 0.2 \times UL + 4.2 \times 10^{-4} \times IFD - 1612.7$$
 (8)

$$WL = 3.3 \times 10^5 + 9.2 \times 10^{-5} \times Pop \times FP - 2.5 \times IFD \times PA - 0.3 \times AL - 8070.8 \tag{9}$$

$$FL = 1.3 \times 10^6 + 0.8 \times Pre + 3.6 \times IFD \times PF - 0.2 \times AR + 0.4 \times AL - 0.9 \times GL - 452$$
 (10)

$$GL = 1.1 \times 10^6 - 0.5 \times AL - 5 \times WL + 742.3 \times Tem - 13.3 \times PS \times IFD + 3.3 \times 10^{-4} \times Pop \times SP - 41.022$$
 (11)

$$UnL = ConsA - AL - CL - WL - FL - GL \tag{12}$$

#### 1.3 北部干旱半干旱生态区土地利用情景模拟拟合公式

$$AL = 3.6 \times 10^5 - 0.1 \times AR + 0.5 \times IA + 6.9 \times 10^{-5} \times (GP \times Pop \times Tec) + 1.4 \times CL + 8.0 \times Pre + 606$$
 (13)

$$CL = 1.0 \times 10^4 + 0.9 \times RL + 1.9 \times UL - 1.0 \times 10^{-2} \times IFD + 199.3$$
 (14)

$$WL = 7.1 \times 10^5 + 2.6 \times 10^{-2} \times Pop \times FP + 11.7 \times IFD \times PA - 1.6 \times AL - 409.3$$
 (15)

$$FL = 8.0 \times 10^{5} + 5.1 \times Pre - 6.3 \times 10^{-2} \times AR - 0.3 \times AL + 0.3 \times GL - 1.7 \times PF \times IFD + 671$$
 (16)

$$GL = 2.5 \times 10^6 - 3.0 \times AL + 0.4 \times WL - 3497.08 \times Tem + 32.4 \times PS \times IFD - 8.9 \times 10^{-3} \times Pop \times SP - 3106$$
 (17)

$$UnL = ConsA - AL - CL - WL - FL - GL \tag{18}$$

#### 1.4 青藏高原生态区土地利用情景模拟拟合公式

$$AL = 4.7 \times 10^4 - 8.6 \times Pre + 2.3 \times CL - 1.5 \times 10^{-2} \times GP \times Pop \times Tec + 152.7 \times IA - 8.1 \times AR - 194.5$$
 (19)

$$CL = 8.1 \times 10^2 + 0.7 \times RL + 6.5 \times UL - 4.5 \times IFD + 0.95$$
 (20)

$$WL = 0.1 \times Pop \times FP + 6.9 \times AL + 180 - 1.0 \times 10^4 - 4.8 \times IFD \times PA$$
 (21)

$$FL = 1.7 \times 10^5 - 5.1 \times 10^{-2} \times Pre - 16.1 \times PF \times IFD + 5.9 \times AL + 0.8 \times AR - 7.4 \times 10^{-2} \times GL - 952$$
 (22)

$$GL = 2.2 \times 10^6 - 75.1 \times AL + 1.8 \times 10^3 \times Tem - 1.6 \times 10^{-2} \times SP \times Pop - 62.8 \times PS \times IFD - 18 159$$
 (23)

$$UnL = ConsA - AL - CL - WL - FL - GL \tag{24}$$

式中: AL, CL, WL, FL, GL, UnL分别为耕地面积,建设用地面积,水域面积,林地面积,草地面积和未利用地面积; Pre为年均降水量; Tem为年均气温; AR为退耕还林面积; IA为农业投资额; GP为人均粮食产量; Pop为人口; Tec为技术进步; RL和UL分别为农村和城市建设用地面积; IFD为固定资产投资额; FP为人均水产产量; SP为人均畜产品产量; PA为水产品投资系数; PF为林业投资系数; PS为畜牧业投资系数; ConsA为模拟地区的土地面积。

# TROPICAL GEOGRAPHY

Vol.37 No.4 July, 2017

## Contents

Chinese Investment in the World and ASEAN Countries
Effect of Industrial Transfer Policy on the Evolution of Regional Product Structure: Based on the "Double Transfer" Policy in Guangdong Province
Perception and Reacting Strategies to Chinese Outbound Tourist Image: Taking Thailand Public Media as an
Example
Tendency and Fluctuation of Different Rainfall Intensities in China during 1961-2015
KONG Feng, FANG Jian, LYU Lili, WANG Zhu, MENG Yongchang, YANG Xu (483)
Characteristics and Causes of Elevated Thunderstorms which Produce Hail in the Cold Sector of Stationary
Front in Guizhou ······ZHOU Mingfei , WAN Xueli , LUO Xiping(493)
Drought Disaster Identification and Changing Tendency in Guangdong Province ·····
Experiments and Simulations of Water Stable Isotopes Fractionation in Evaporation Pan
Characteristics of the Evolution of Hydrological Regimes across the Poyang Lake Region in the Past 60 Years
Interactions between Groundwater and Lake Water of Riparian Zone in the Typical Area of Poyang Lake ····
LI Yunliang , ZHAO Guizhang , YAO Jing , ZHANG Qi( 529 )
Evolution of Domestic Spatial Pattern of Sino-Africa Trade · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
TONG Ruifeng, REN Hang, WANG Xin, WANG Huan, ZHANG Zhenke(537)
Spatial Changes of AIDS Epidemic and Population Mobility in China
DING Qiyan, YANG Zhen, ZHOU Qingyu( 546)
Simulating Multiple Land Use Scenarios in China during 2010-2050 Based on System Dynamic Model · · · · ·
TIAN He, LIANG Xun, LI Xia, LIU Xiaoping, OU Jinpei, HONG Ye, HE Zhijian (560)
Catering Cultural Production under the Background of Globalization and Locality: Spatial-temporal
Characteristics of Teochew Cuisine Ingredients
National Park Selection Mechanism in Canada Based on System Feedback ·····
Spatial-temporal Evolution of Japanese Visiting-China Market
Retail Store Rent Calculation for Mountain Scenic Spot: A Case Study of Huangshan Scenic Area ···········
QI Huangxiong, ZOU Xiaomeng, JIANG Changchun, MA Na, LIN Shen, LIN Yuxian, FEI Weicheng (600)
Spatial-temporal Pattern and Influencing Factors of Environmental Quality in Guangdong, China
Discovery and Scientific Significance of Qixinggang Relics of Ancient Coast, Guangzhou
Re-discussion on the Development and Management of the Lingdingyang Bay at Pearl River Estuary
LI Pingri , ZHOU Qing( 626 )

# 《热带地理》编委会(第八届)

### **Editorial Board of Tropical Geography**

顾 问	叶嘉安	刘昌明	孙鸿烈	李文华	陆大道	郑 度
Advisors	YE Jia'an	LIU Changming	SUN Honglie	LI Wenhua	LU Dadao	ZHENG Du
	童庆禧	司徒尚纪	许自策	许学强	李平日	陈朝辉
	TONG Qingxi	SITU Shangji	XU Zice	XU Xueqiang	LI Pingri	CHEN Chaohui
	赵焕庭	徐君亮	梁国昭	蔡人群	Walter F	. Parham (美)
	ZHAO Huanting	XU Junliang	LIANG Guozhao	CAI Renqun	waiter L	. Tarmam (天)
主编	黄光庆					
<b>Editor in Chief</b>	HUANG Guangqing					
副主编	张虹鸥	黎夏	宗永强(英)	李小玲(常	条)	
Associate Editors	ZHANG Hong'ou	LI Xia	ZONG Yongqiang	LI Xiaoling	,	
编 委	仇荣亮	方创琳	王云鹏	王世福	王姣娥	邓孺孺
<b>Editorial Board</b>	QIU Rongliang	FANG Chuanglin	WANG Yunpeng	WANG Shifu	WANG Jiao'e	DENG Ruru
Members	任 海	刘云刚	匡耀求	朱 竑	朱照宇	何深静
	REN Hai	LIU Yungang	KUANG Yaoqiu	ZHU Hong	ZHU Zhaoyu	HE Shenjing
	余克服	吴志峰	吴绍洪	宋长青	张占仓	张京祥
	YU Kefu	WU Zhifeng	WU Shaohong	SONG Changqing	ZHANG Zhancang	ZHANG Jingxiang
	张俊斌	李志刚	李秀彬	李芳柏	李定强	李郇
	ZHANG Junbin	LI Zhigang	LI Xiubin	LI Fangbai	LI Dingqiang	LI Xun
	李适宇	杨守业	陈水森	陈忠暖	陈健飞	陈晓宏
	LI Shiyu	YANG Shouye	CHEN Shuisen	CHEN Zhongnuan	CHEN Jianfei	CHEN Xiaohong
	陈 雯	周厚云	周素红	易顺民	林初昇	林宗贤
	CHEN Wen	ZHOU Houyun	ZHOU Suhong	YI Shunmin	LIN Chusheng	LIN Chunghsien
	林建平	林 耿	郑 卓	保继刚	钟 巍	黄宁生
	LIN Jianping	LIN Geng	ZHENG Zhuo	BAO Jigang	ZHONG Wei	HUANG Ningsheng
	曾刚	董玉祥	雷小途	熊康宁	薛德升	Xiaojun YANG (美)
	ZENG Gang	DONG Yuxiang	LEI Xiaotu	XIONG Kangning	XUE Desheng	
14 LD 40	(以姓氏笔划为序)					
编辑部	李小玲	黄 艳	郭亿华			
<b>Editorial Office</b>	LI Xiaoling	HUANG Yan	GUO Yihua			

## 热带地理

**REDAI DILI** 

(双月刊 1980年创刊)

第37卷 第4期 2017年7月

### TROPICAL GEOGRAPHY

Bimonthly

(Started in 1980)

Vol. 37 No. 4 July, 2017

主	管	广东省科学院	Superintended by	Guangdong Academy of Sciences
主	办	广州地理研究所	Sponsored by	Guangzhou Institute of Geography
主	编	黄光庆	<b>Editor in Chief</b>	HUANG Guangqing
编辑	出版	《热带地理》编委会	Editor & Publisher	Editorial Committee of Tropical Geography
		广州市先烈中路 100 号大院广州地理研究所邮编: 510070		Guangzhou Institute of Geography, 100 Xianliezhong Road, Guangzhou 510070, China
		电话: (020)37656954		Tel: (020)37656954
		E-mail: bjb@gdas.ac.cn; 1258717596@qq.com		E-mail: bjb@gdas.ac.cn; 1258717596@qq.com
		http://www.rddl.com.cn		http://www.rddl.com.cn
印刷	装订	广州一龙印刷有限公司	Printed by	Guangzhou Yilong Printing Co., Ltd.
发行i	订购	《热带地理》编辑部	Distributed by	Editorial Office of Tropical Geography
国外,	总发行	中国国际图书贸易总公司	Overseas order	China International Book Trading Corporation
		北京 399 信箱 邮编: 100044		P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国际标准刊号 ISSN 1001-5221 中国标准刊号 CN 44-1209/N 国外发行代号: BM896

国内定价: 24.00 元

国内外公开发行