

邬建国,何春阳,张庆云,等. 全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策[J]. 地球科学进展,2014,29(12):1 315-1 324,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.12.1315. [Wu Jianguo, He Chunyang, Zhang Qingyun, et al. Integrative modeling and strategic planning for regional sustainability under climate change[J]. Advances in Earth Science,2014,29(12):1 315-1 324,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.12.1315.]

# 全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策<sup>\*</sup>

邬建国<sup>1,2,3</sup>,何春阳<sup>1,2\*</sup>,张庆云<sup>4</sup>,于德永<sup>1,2</sup>,黄甘霖<sup>1,2</sup>,黄庆旭<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学人与环境系统可持续性研究中心,北京 100875;2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;3. 美国亚利桑那州立大学生命科学院和全球可持续性研究所,坦佩,亚利桑那州 85287;4. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

**摘要:**全球气候变化和土地利用/覆盖变化已经导致了許多地区的水资源短缺、生态系统服务退化和巨灾风险增加等一系列生态环境问题。如何有效地应对气候变化风险,促进全球和区域的可持续发展,是当前全球变化研究中的一个重要论题。国家重点基础研究发展计划项目“全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策(2014CB954300)”以可持续性科学为主要依据,以有序人类活动理念为指导思想,以实地观测、模型模拟和情景分析为主要手段,揭示气候变化和人类活动的定量关系,评估气候变化条件下人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的影响,建立气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,提出景观及区域尺度上人类适应全球变化的综合策略。该研究项目将有助于发展和完善景观可持续性科学,促进我国半干旱地区主动适应全球气候变化的土地系统设计的理论和实践。

**关键词:**景观可持续性科学;土地系统设计;有序人类活动;全球气候变化;模型

**中图分类号:**P467;P96 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2014)12-1315-10

## 1 引言

景观可持续性科学(Landscape sustainability science)是聚焦于景观和区域尺度的,通过空间显式方法来研究景观格局、生态系统服务和人类福祉之间相互关系的一门新兴科学<sup>[1,2]</sup>。土地系统设计(Land system design)是通过主动设计,优化和改造不同尺度的土地系统组成和空间结构(主要包括不同土地镶嵌体的类型、大小、形状、分布和连接度等要素)来维持和改善区域生态系统服务,从而有效适应以气候变化为代表的环境干扰,提高区域人类

福祉的一种新兴的土地资源利用理念<sup>[3]</sup>。有序人类活动是指通过合理安排和组织,使自然环境能在长时期、大范围不发生明显退化,甚至能持续好转的同时,满足当地社会经济发展对自然资源和环境需求的人类活动。这是由我国气象学家叶笃正<sup>[4]</sup>提出的应对全球气候变化的一个创新性理念。景观可持续性科学和土地系统设计是可持续性科学、景观生态学和土地变化科学相互影响、密切结合的产物,代表了当前国际可持续性科学发展的一个新动向。有序人类活动的概念则继承了1987年“世界环境与发展委员会”对“可持续发展”定义的核心思想,集

\* 收稿日期:2014-11-16;修回日期:2014-12-02.

\* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策”(编号:2014CB954300)资助。  
作者简介:邬建国(1957-),男,内蒙古乌拉特前旗人,教授,主要从事景观生态学、城市生态学和可持续性科学研究。

E-mail: Jingle. Wu@asu.edu

\* 通讯作者:何春阳(1975-),男,四川射洪人,教授,主要从事土地利用/覆盖变化、景观可持续性科学与城市可持续性研究。

E-mail: hey@bnu.edu.cn

中反映了中国科学家通过群体协同,调控区域发展格局而实现主动减缓和适应气候变化的新思考。进而言之,有序人类活动的基本思想是通过人地系统模拟,揭示人类活动与气候系统的相互作用机理,进而合理调控和优化区域人地系统时空格局,达到主动适应气候变化并促进可持续发展的目的<sup>[5,6]</sup>。

国家重点基础研究发展计划项目“全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策”正是基于景观可持续性科学、土地系统设计和有序人类活动的基本思想,围绕人类如何主动有序地应对全球气候变化,从而促进区域可持续发展的一个多学科整合性研究。该项目由国家科技部在2013年10月批准,于2014年初正式启动。项目包括3个课题:①“区域气候变化与人类活动定量关系”;②“区域生态系统服务和人类福祉关系模型”;③“适应气候变化的区域可持续性范式”。旨在为全球气候变化背景下区域可持续发展提供一个科学研究和实践的范式。

## 2 研究背景

全球变化(Global change)是指由自然和人文因素引起的地球系统功能的全球尺度的变化,其科学基础是地球系统科学,涉及到数十年到百年、或更长的时间尺度。以当前全球变暖为标志的气候变化是全球变化的重要表现之一<sup>[7]</sup>。大量研究表明,以工业革命后人类活动为主要原因,以全球变暖为主要特征的全球气候变化已经导致了水资源短缺、生态系统服务退化和巨灾风险增加等一系列生态环境问题<sup>[8]</sup>。全球气候变化已经威胁到全球和我国生存环境及社会经济的可持续发展<sup>[8]</sup>。在认清气候变化事实,分清气候变化责任的基础上,如何有效应对气候变化风险,促进全球和区域的可持续发展,是当前全球变化研究中的一个重要论题。2005年,中国制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,将“全球变化与区域响应”列为未来15年面向国家重大战略需求的基础研究的10个方向之一。2010年,我国全球变化研究国家重大科学研究计划启动,也将该方向列为了重点。与此同时,国际科学联合会理事会(International Council of Scientific Unions, ICSU)联合相关国际组织,整合已有研究(国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP),国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP),世界气候研究计划(World Climate

Research Programme, WCRP)和国际生物多样性计划(An International Programme of Biodiversity Science, DIVERSITAS))启动了新一轮的全球变化10年科学计划——未来地球计划(Future Earth), 突出强调了未来全球变化的基本目标是在可持续性科学的指导下,有效适应全球变化,实现全球的可持续性<sup>[9]</sup>。

我们认为,当前全球气候变化适应研究中的一个至关重要但又一直被忽略的途径是景观/区域途径。即通过景观和区域尺度上的有序人类活动,优化城乡发展战略和土地利用空间格局,在减缓和适应气候变化的同时长期维持和改善生态系统服务与人类福祉,从而实现区域可持续发展。近年来,这个问题已被越来越多的科学家所论及,但实际研究尚少<sup>[10~13]</sup>。

北京师范大学、中国科学院大气物理研究所、中国科学院植物研究所和中国科学院地理科学与资源研究所联合开展全球变化与区域可持续发展耦合模型及调控对策研究。该研究以可持续性科学为主要依据,以有序人类活动理念为指导思想,以实地观测和模型模拟为主要手段,揭示气候变化和人类活动的定量关系,评估气候变化条件下人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的影响,建立气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,提出景观及区域尺度上人类适应全球变化的综合策略。

## 3 相关研究进展

### 3.1 全球变化与人类有序适应

过去20年,我们已经对人类活动如何影响全球环境变化有了一个基本的认识:目前的全球变化速率很大程度上已经超过了人类的响应,即人类现在的发展模式是不可持续的<sup>[14,15]</sup>。在认清全球变化的基本事实后,全球变化的适应研究,尤其是全球变化背景下的区域可持续发展研究已经逐渐成为当前全球变化科学研究的前沿和重点<sup>[16]</sup>。

有序人类活动是由我国气象学家叶笃正提出的全球气候变化适应研究中的一个创新性理念<sup>[4,17]</sup>。有序人类活动的关键在于强调人类整体利益的发展和可持续性,即整体利益最佳,而非某局部利益最佳<sup>[5]</sup>。核心在于探寻人类生存环境演变规律及其机理,寻求人类活动的最佳方式,以使得人类在全球变化的背景下适应未来生存环境的变化,争取最大的总体效益(由环境效益、经济效益和社会效益“三大效益”构成),实现可持续发展<sup>[5]</sup>。

有序人类活动方法的基本思路是通过建立具备“反馈机制”的人类—气候—环境模式,基于各情景对比分析,选择全球最佳的人类有序应对全球变化的方案<sup>[4,18]</sup>。近年来,已经可见通过土地利用规划和生态建设等有序人类活动主动适应气候变化的部分探索<sup>[19-21]</sup>。如我国的“三北”防护林体系建设、京津风沙源治理工程、天然林保护工程、防治荒漠化工程、生物多样性保育和自然保护区建设工程等有序生态建设工程,已经对气候变化产生了积极影响<sup>[21]</sup>。但目前的有序人类活动研究还主要停留在理念阶段,具体深入的实践应用研究还比较缺乏。

### 3.2 生态系统服务、人类福祉和区域可持续性

生态系统服务和人类福祉是表达区域可持续性的 2 个基本方面,维持和改善生态系统服务是实现区域可持续发展的基本条件,提高人类福祉是实现区域可持续发展的根本目的<sup>[1]</sup>。依据联合国千年生态系统评估报告,生态系统服务主要指人类从生态系统中所获取的福利,可分为支持、供给、调节和文化 4 类服务类型;人类福祉主要指人类在物质、精神和健康方面的需求,可分为基础生活材料、安全、健康、良好的社会资本和宽松的制度环境 5 个方面<sup>[22]</sup>。生态系统服务和人类福祉密切相关,多样化的人类福祉一般通过不同的生态系统服务类型得到满足和实现。同时,受资源的限制,不同类型的生态系统服务之间也存在权衡问题。某一类型的生态系统服务的增加往往会造成其他类型服务的降低。如扩大耕地面积可以提高粮食产量,从而增加供给服务,却往往以调节服务、文化服务和生物多样性的损失为代价<sup>[23]</sup>。

当前,全球气候变化正深刻地影响到区域生态系统服务和人类福祉,进而影响到区域可持续性<sup>[3]</sup>。首先,全球气候变化改变了生物多样性的结构和功能,直接影响到生态系统初级生产力、产品供给、调节能力等生态系统服务<sup>[24]</sup>。同时,全球气候变化也通过改变生态过程间接改变了生态系统服务的供给能力<sup>[25]</sup>。此外,全球气候变化还使得极端天气频发,加剧了森林火灾、山洪暴雨、泥石流等自然灾害发生的概率,间接增加了生态系统的脆弱性,进而影响到生态系统服务和相应的人类福祉<sup>[25]</sup>。

由此可见,在全球气候变化的压力下,实现区域尺度可持续发展的根本途径在于有效提高区域人类—环境系统的弹性,维持和改善区域生态系统服务,进而提高人类福祉<sup>[1]</sup>。通过有序人类活动合理调控区域人类—环境系统,维持和改善区域生态系

统服务并提高人类福祉,主动适应全球气候变化,是能够在全球气候变化的压力下实现区域可持续发展目标的<sup>[1,26,27]</sup>。但当前景观和区域尺度上定量表达区域生态系统服务与人类福祉的关系的相关研究尚处于起步阶段。

### 3.3 可持续性科学和景观/区域可持续性研究

可持续性(Sustainability)正日益成为农业、林业、城市设计与发展、商业、环境保护、环境管理等人类与环境发生关系的所有领域的关注焦点。美国生态学会早在 1991 年就发起了可持续生物圈行动(Sustainable Biosphere Initiative)<sup>[28]</sup>。至 2001 年,可持续性科学已经发展成为一门新兴的科学<sup>[29,30]</sup>。当前,地球环境正以人类从未经历的速度快速恶化,对地球可持续发展提出了巨大的挑战。因此,可持续性科学突出强调在人类发展的同时,要保持和维护环境系统满足人类长期需求的能力,尤其是有效保持和维护区域生态系统服务满足人类福祉需求的能力<sup>[22]</sup>。

当前,在人类土地利用和气候变化的双重力量驱动下,全球生态系统和景观的变化正在加速。土地利用对景观的影响一般是短期和局部的,而气候变化对景观的影响是长期和全球性的。在土地利用变化的驱动下,自然景观向人类主导景观的转变往往导致植被和生境的破碎化,进而破坏景观连接度,增加其空间同质性,使景观的维系能力发生改变或退化<sup>[31]</sup>。在气候变化的影响下,许多物种可能在地理分布上发生迁移。同时,气候变化还将改变景观结构与组成、斑块质量与周围环境、景观镶嵌体中斑块分布与形状等,使得景观中某些位置和要素提供的某种生态系统服务将不复存在<sup>[32]</sup>。

因此,近年来,景观/区域可持续性作为可持续性研究的一个重要分支,逐渐得到研究者的重视<sup>[33]</sup>。景观可持续性可以从 2 个方面来理解:一是景观自身的格局与过程在未来的维持程度;二是景观对人类需求(如生态系统服务)或有机体生活(如觅食、交配等)的可持续性的影响<sup>[34]</sup>。景观可持续性研究的主要对象是景观格局、生态系统服务和人类福祉,它们三者之间有着密切的联系<sup>[1,35]</sup>。

### 3.4 我国北方半干旱区的相关研究进展

我国北方半干旱区主要指年降水量在 200 ~ 400 mm 的草地和农牧交错地区。该区位于内蒙古高原的东南缘和黄土高原北部,属全球气候变化的敏感区、土地利用的交错区以及典型的生态系统脆弱区<sup>[36]</sup>。全球气候变化导致了我国北方半干旱区

的生态环境持续恶化,直接或间接影响了该区域生态系统服务和人类福祉,降低了区域的可持续性<sup>[37]</sup>。如区域初级生产力和固碳能力下降,粮食以及畜牧生产力降低<sup>[38]</sup>;植被退化、固碳、涵养水源和防风固沙能力降低等<sup>[39]</sup>。同时,近年不合理的人类活动,进一步加剧了该区的不可持续性。如地下资源开采过度,城乡发展不协调,贫富差距过大;沙尘暴频发,大气污染加剧;民族文化流失,民族关系紧张等<sup>[40]</sup>。

针对我国北方半干旱区可持续发展中的诸多问题,国内学者开展了一系列的研究。张新时等<sup>[41]</sup>提出了该区域系列“优化生态—生产范式”。康慕谊等<sup>[42]</sup>完成了该区域的生态区划。袁飞等<sup>[43]</sup>开展了该区域生态系统生产力形成机制以及生态系统维持与适应性管理的系统研究。傅伯杰等<sup>[44]</sup>在黄土高原开展了区域生态系统服务的系统研究。方精云等<sup>[45]</sup>在内蒙古草原开展了草地生态系统和“生态草业特区”的系统研究。这些研究为我国北方半干旱区的可持续发展奠定了良好基础。但总的看来,我国北方半干旱地区全球气候变化、人类活动和区域可持续发展的综合集成研究工作还比较缺乏,还需要在景观/区域可持续性科学等新的理论和方法的指导下开展进一步的工作。

综上,可见以下研究趋势:

(1) 正从全球变化的事实和影响研究转向全球变化的减缓和适应研究,强调通过人类自身行为的改变,主动有序地适应全球气候变化,争取人类整体利益的发展和可持续性。

(2) 正从全球变化的区域响应和适应研究转向全球变化背景下的区域可持续性研究,强调通过土地系统和景观的重新设计,协调全球变化背景下生态系统服务和人类福祉之间相互关系,实现区域可持续发展。

(3) 正从局部、个别的案例研究转向全球变化背景下社会—经济—环境可持续性的综合协同研究,强调通过典型区域全球气候变化、人类活动和可持续发展的综合系统集成,寻求全球变化科学和可持续性科学的新突破。

## 4 关键科学问题

### 4.1 如何在区域尺度定量表达气候变化与人类活动的关系?

如何通过人类活动的合理组织,主动有序地适应气候变化,达到整体利益的最佳,而非某个国家或

地区局部的最佳是当前全球变化适应研究的最新动向和关键科学问题。由叶笃正等<sup>[4]</sup>提出的通过有序人类活动,主动有序适应气候变化,促进地球系统可持续性的创新性理念,正受到当前全球变化适应研究领域的高度重视和关注。但目前相关研究仍然处于探索和起步阶段。有序人类活动的基本理论、方法和途径,尤其是从气候影响因子的角度怎样量化人类活动,以及不同的人类活动如何影响气候变化等问题,还需要深入的研究。因此本项目将在深化有序人类活动基本理论、方法和途径的基础上,基于区域气候模式,以我国北方半干旱区为基本研究区,定量揭示和表达全球气候变化和人类活动之间的关系,模拟评估未来不同人类活动情景对气候变化过程的可能影响,从而回答如何在区域尺度定量表达气候变化与人类活动的关系这一关键科学问题。

### 4.2 如何在区域尺度定量揭示气候变化条件下生态系统服务和人类福祉的关系?

区域生态系统服务和人类福祉是区域可持续发展的2个重要基础。通过有序人类活动主动适应气候变化,促进区域可持续发展的关键是深入揭示气候变化下区域生态系统服务和人类福祉的相互关系。因此,本项目拟选择典型区域和典型案例,采用模型模拟和实地调查手段,分析气候变化背景下区域生态系统服务和人类福祉的基本特征,评估人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的影响过程,发展区域生态系统服务和人类福祉关系模型,从而回答如何在区域尺度上定量揭示气候变化条件下生态系统服务和人类福祉的关系这一关键科学问题。

### 4.3 如何在区域尺度上建立适应气候变化的可持续性范式?

过去由于不合理的农牧业发展方式,造成了我国北方半干旱区生态环境日益脆弱。目前该区域总体环境仍未见根本好转<sup>[41]</sup>。在全球气候变化压力下,该区域生态系统的脆弱性不断增加,人类—环境系统抵抗灾害的能力不断减弱,表现出局部治理、整体恶化的特点<sup>[41,44]</sup>。主要原因是目前的理论与实践工作均相对集中在点层面上,缺乏对区域人类—环境系统的多尺度的综合集成研究。为此,本项目将发展气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,评估该区域可持续发展的基本特征,揭示该区域自然景观、半自然景观、农业景观及城市景观的演化机制,探索不同尺度下合理的土地利用配置与管理方式,进而通过政策框架、技术方法和科学理

论的综合集成,构建主动适应气候变化的生态良好、生产发展和生活富裕的区域可持续性范式,从而回答如何在区域尺度上建立适应气候变化的可持续性范式这一关键科学问题。

## 5 研究内容

### 5.1 气候变化与人类活动的定量关系

目的在于定量表征影响气候变化的人类活动因子,完善区域气候系统模式,揭示区域人类活动与气候变化的相互关系,给出中国北方半干旱区人类活动影响下的未来气候情景。主要研究内容有:

(1) 影响气候变化的人类活动因素的定量表达。结合我国北方半干旱区的区域特点和气候变化特征,利用温度、降水、风等气候因子变化历史观测数据,土地利用/覆盖类型和格局变化数据,人口、产业结构等社会经济变化数据,通过揭示人类活动与气候变化的内在联系,建立影响气候变化的人类活动因素的指标体系。

(2) 完善区域气候系统模式。通过对人类活动因素的定量表达,发展区域人类活动与气候变化的相互关系模块,完善区域气候系统模式。进而模拟区域大气过程、生态与地理过程等,评价气候变化和人类活动的关系,给出景观和区域尺度的人类活动与气候变化关系的定量表达,并结合中国北方半干旱区的特点,进行敏感性和不确定性分析。

(3) 人类活动影响下的中国北方半干旱区未来气候变化情景模拟。利用完善后的区域气候系统模式,结合人口、经济、产业结构等社会经济发展目标,在景观和区域尺度上给出土地利用、城市化、产业转型和生态建设等人类活动影响下的中国北方半干旱区未来气候变化情景。

### 5.2 气候变化背景下生态系统服务和人类福祉

目的在于发展区域生态系统服务和人类福祉关系模型,评估人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的影响过程,揭示气候变化背景下人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的调控机制。主要研究内容有:

(1) 气候变化情景下人类活动对区域生态系统服务的影响。发展区域生态系统服务功能评价模型,揭示我国北方半干旱区关键生态系统服务功能(以粮食生产、防风固沙、减排增汇和保持民族文化为代表)的基本格局特征和空间异质性。耦合区域气候模式和生态系统服务评价模型,在分析近30年土地利用、城市化、产业结构变化和生态建设

等人类活动对区域生态系统服务影响过程的基础上,模拟评估未来50年气候变化情景下人类活动对区域生态系统服务的潜在影响,确定调控人类活动、改善区域生态系统服务的关键影响因素。

(2) 区域生态系统服务和人类福祉关系模型。参考千年生态系统评估方法,从支持、供给、调节和服务4个方面选择区域关键生态系统服务(以粮食生产、防风固沙、减排增汇和保持民族文化为代表),从基础生活材料、安全、健康、良好的社会资本和宽松的制度环境5个方面选择区域典型人类福祉指标(以食品供给、人群健康、和谐社区为代表),构建区域生态服务功能与人类福祉评估体系。通过多源遥感信息和参与式调查,获取区域近30年生态服务功能时间序列指标数据集和人类福祉指标时空数据集。通过典型案例的深入分析,利用空间分析方法和生态模型模拟手段,在自然景观、半自然景观、农业景观和城市景观等不同景观类型上揭示区域关键生态系统服务和主要人类福祉的源汇、权衡和协同关系,发展区域生态系统服务和人类福祉的关系模型。

(3) 气候变化背景下人类活动对区域人类福祉的影响。在样点和区域2个尺度上,揭示我国北方半干旱区典型人类福祉指标(以食品供给、人群健康、和谐社区为代表)的基本格局特征和空间异质性。在分析近30年土地利用、城市化、产业结构变化和生态建设等人类活动对区域人类福祉影响过程的基础上,模拟评估未来50年气候变化情景下人类活动对区域人类福祉的潜在影响,确定调控人类活动、改善区域人类福祉的关键影响因素。

### 5.3 适应气候变化的区域可持续性范式

目的在于发展气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,建立主动适应气候变化的生态良好、生产发展和生活富裕的区域可持续发展范式,提出适应气候变化的半干旱区可持续发展调控策略。主要研究内容有:

(1) 气候变化下的区域可持续性评价指标体系。建立社会—经济—环境耦合系统脆弱性、恢复性和适应性为一体的区域可持续性评价指标体系及评价方法,评价温度、降水、风等气候因子变化,土地利用/覆盖类型和格局变化以及人口、产业结构与政策及规制等社会经济因素变化对区域可持续性的综合影响,提出主动适应气候变化的自然景观保护/恢复、半自然景观修复、农业景观改良和城市景观布局的区域规划方案。

(2) 气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型。从人类社会—经济—环境耦合系统的人类—环境系统的整体性出发,运用系统论观点,结合数值模拟和数学建模技术,整合气候变化与人类活动关系定量模型、生态系统服务与人类福祉关系模型及区域人口经济模型,构建气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,通过未来情景分析,模拟评估未来不同气候变化情景与不同景观规划方案对区域可持续性发展的综合影响。

(3) 适应气候变化的半干旱区土地系统优化。以我国内蒙古锡林郭勒草业特区建设、鄂尔多斯城乡一体化发展及美国凤凰城城市化为主要案例,开展国别案例对比研究,分析各案例在不同的政治制度、人口与经济产业结构、文化和社会体系下适应气候变化的效率与效益。以生态系统格局与过程、生态系统服务与人类福祉协同优化为目标,从群落及生态系统组成、结构与空间布局等方面提出区域土地系统综合优化方案,并从政策框架、技术实现途径、经济与社会管理等方面提出保障措施,从而建立主动适应气候变化的生态良好、生产发展和生活富裕的区域可持续发展范式。

## 6 研究方案

以景观/区域可持续性科学为主要依据,以区域生态系统服务不降低和人类福祉有提高为基本目标,利用主动适应气候变化的有序人类活动(主要是土地系统设计和规划),打造可持续景观/区域,揭示气候变化背景下人类活动和区域可持续发展的定量关系,建立适应气候变化的区域可持续性范式,提出区域尺度人类适应全球变化的综合策略(图 1)。

项目将主要采用实地调查、模型模拟和实证案例分析综合集成的研究方法(图 2)。

## 7 预期目标

(1) 改善区域气候模式,定量表达区域气候变化与人类活动的关系,发展和完善有序人类活动的基本理论和方法。

(2) 发展区域生态系统服务和人类福祉关系模型,定量揭示气候变化背景下人类活动对区域生态系统服务和人类福祉的影响过程和机理,为气候变化背景下的区域可持续发展提供理论基础。

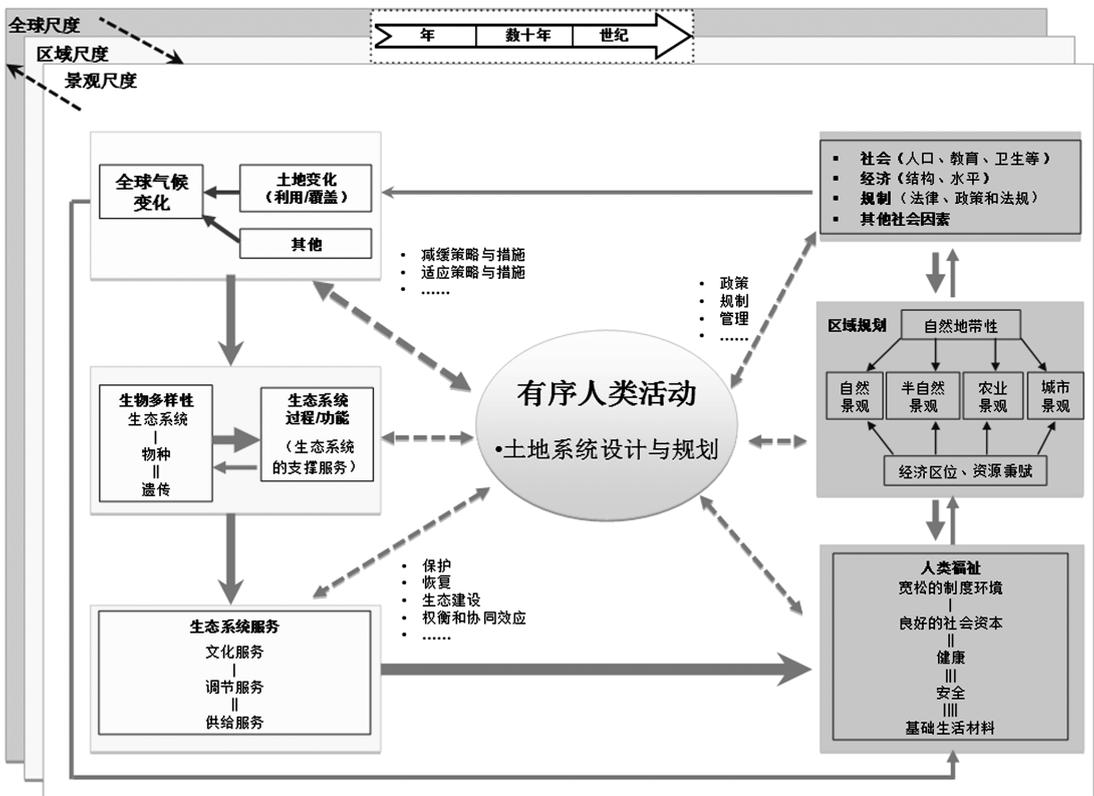


图 1 研究思路

Fig. 1 Research framework

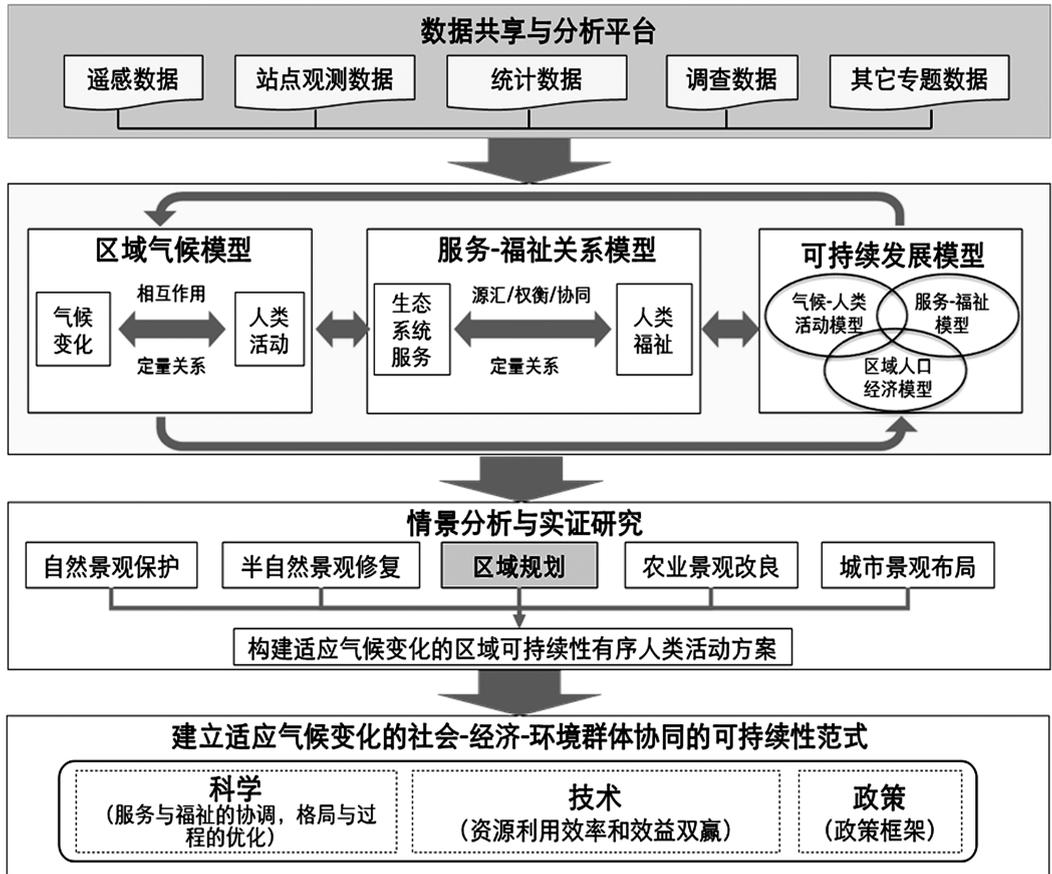


图 2 技术路线

Fig. 2 Research framework

(3) 建立气候变化—有序人类活动—区域可持续发展耦合模型,提供一套气候变化背景下可持续景观和区域的再设计、再优化和再布局的新方法,为全球气候变化背景下的区域可持续发展提供科学工具。

(4) 提出半干旱地区主动适应气候变化的区域可持续范式,丰富和发展全球气候变化背景下的景观/区域可持续性科学。

**致谢:**感谢林海研究员、方精云研究员、傅伯杰研究员、刘纪远研究员和史培军教授等专业性和建设性的意见。感谢毛齐正、赵媛媛和刘志锋,以及其他参与该项目的研究人员和研究生所做出的贡献。

#### 参考文献 (References):

[1] Wu J. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human wellbeing in changing landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28:999-1 023.

[2] Wu Jianguo, Guo Xiaochuan, Yang Jie, et al. What is sustainability

science? [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 25(1): 1-11. [郭建国, 郭晓川, 杨劫, 等. 什么是可持续性科学? [J]. *应用生态学报*, 2010, 25(1): 1-11.]

- [3] Turner II B L, Janetos A C, Verburg P H, et al. Land system architecture: Using land systems to adapt and mitigate global environmental change[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23: 395-397.
- [4] Ye Duzheng, Fu Congbin, Ji Jinjun, et al. Orderly human activities and subsistence environment [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(4): 453-460. [叶笃正, 符淙斌, 季笃钧, 等. 有序人类活动与生存环境[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 453-460.]
- [5] Ye Duzheng, Fu Congbin, Dong Wenjie, et al. Some advance in global change science study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 435-450. [叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学领域的若干研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 435-450.]
- [6] Ye Duzheng, Yan Zhongwei. On orderly adaptation to global warming[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 66(6): 855-856. [叶笃正, 严中伟. 全球变暖的有序适应问题[J]. *气象学报*, 2009, 66(6): 855-856.]
- [7] Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Global Change Research of Major National Scientific Re-

- search Plan "1025" Planning[Z]. 2012,1. [中华人民共和国科学技术部. 全球变化研究国家重大科学研究计划“十二五”专项规划(公示稿)[Z]. 2012,1.]
- [8] Qin Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. Climate and Environment Changes in China ( I ): Changes and Prediction of Climate and Environment in China[M]. Beijing: Science Press, 2005. [秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(上卷): 中国气候与环境的演变与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [9] ICSU. Earth System Science for Global Sustainability: The Grand Challenges[C]. Paris: International Council for Science, 2010.
- [10] Pielke R A, Avissar R. Influence of landscape structure on local and regional climate[J]. *Landscape Ecology*, 1990, 4:133-155.
- [11] Shi Peijun, Jiang Yuan, Wang Jing'ai, et al. Land Use/Land Cover Change and Ecological Security Response Mechanism[M]. Beijing: Science Press, 2004. [史培军, 江源, 王静爱, 等. 土地利用覆盖变化与生态安全响应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [12] Wu Jianguo. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy(Second Edition)[M]; Beijing: Science Press, 2007. [邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级(第2版)[M]. 北京: 高教出版社, 2007.]
- [13] Opdam P, Luque S, Jones K B. Changing landscapes to accommodate for climate change impacts: A call for landscape ecology[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24:715-721.
- [14] Chen Yiyu, Ding Yongjian, She Zhixiang, et al. Climate and Environment Changes in China ( II ): Measures to Adapt and Mitigate the Effects of Climate and Environment Changes[M]. Beijing: Science Press, 2005. [陈宜瑜, 丁永建, 佘之祥, 等. 中国气候与环境演变(下卷): 气候与环境变化的影响与适应、减缓对策[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]
- [15] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [16] The Council of the Second National Assessment Report on Climate Change. Second National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2011. [第二次气候变化国家评估报告编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [17] Fu Congbin, Dong Wenjie, Wen Gang, et al. Regional response and adaptation to global change[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 245-250. [符宗斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域响应和适应[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 245-250.]
- [18] Zheng Du, Chen Shupeng. Progress and disciplinary frontiers of geographical research[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(5): 599-606. [郑度, 陈述彭. 地理学研究进展与前沿领域[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 599-606.]
- [19] Wu J. A landscape approach for sustainability science[M] // Weinstein M P, Turner R E, eds. Sustainability Science: The Emerging Paradigm and the Urban Environment. New Mork: Springer, 2012:59-78.
- [20] Xiao Duning, Li Xiuzhen. Forefronts and future strategies of landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1 615-1 621. [肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1 615-1 621.]
- [21] Shi Peijun, Wang Jing'ai, Feng Wenli, et al. Response of eco-environmental security to land use/cover changes and adjustment of land use policy and pattern in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 111-119. [史培军, 王静爱, 冯文利, 等. 中国土地利用/覆盖变化的生态环境安全响应与调控[J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 111-119.]
- [22] MEA. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis [R]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [23] Wang S, Fu B. Trade-offs between forest ecosystem services[J]. *Forest Policy and Economics*, 2012, 26: 145-146.
- [24] Richardson A J, Schoeman D S. Climate impact on plankton ecosystems in the northeast Atlantic[J]. *Science*, 2004, 305: 1 609-1 612.
- [25] Schröter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe[J]. *Science*, 2005, 310: 1 333-1 337.
- [26] Sun Honglie. China ecosystem research network has provided scientific and technological support for ecosystem assessment[J]. *Resources Science*, 2006, 28(4): 2-3. [孙鸿烈. 中国生态系统研究网络为生态系统评估提供科技支撑[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 2-3.]
- [27] Ouyang Zhiyun, Zhen Hua, Huang Baorong, et al. Regional Ecological Environmental Quality Assessment and Ecological Function Regionalization[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. [欧阳志云, 郑华, 黄宝荣, 等. 区域生态环境状况评价与生态功能区划[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.]
- [28] Lubchenco J, Olson A M, Brubaker L B, et al. The Sustainable Biosphere Initiative: An ecological research agenda[J]. *Ecology*, 1991, 72:371-412.
- [29] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development: Sustainability science [J]. *Science*, 2001, 292(5 517): 641-642.
- [30] Kates R W. What kind of a science is sustainability science? [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(49): 19 449-19 450.
- [31] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309:570-574.
- [32] Shaw M R, Pendleton L, Cameron D R, et al. The 332 impact of climate change on California's ecosystem services[J]. *Climate Change*, 2011, 109 (Suppl. 1): S465-S484.
- [33] Wu J, Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis [J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17:355-365.
- [34] Cumming G S, Olsson P, Chapin F S III, et al. Resilience, experimentation, and 264 scale mismatches in social-ecological landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28:1 139-1 150.
- [35] Hobbs R J. Landscape ecology and conservation: Moving from description to application [J]. *Pacific Conservation Biology*,

- 1994, 1:170-176.
- [36] Shi Peijun, Ha Si. Comparison between Holocene environmental changes in north China agro-pastoral zone and Africa Sahelian Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 121-128. [史培军, 哈斯. 中国北方农牧交错带与非洲萨哈尔地带全新世环境变迁的比较研究[J]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 121-128.]
- [37] Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the Northern China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1): 22-29. [符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. *气候与环境研究*, 2002, 7(1): 22-29.]
- [38] Gao Zhiqiang, Liu Jiyan, Cao Minghui, et al. Land use and climate change impacts on the productivity and carbon cycling of the ecological system in agro-pastoral transitional zone[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(10): 946-957. [高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(10): 946-957.]
- [39] Liu Junhui, Gao Jixi. Effects of climate and land use change on the changes of vegetation coverage in farming-pastoral ecotone of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2 016-2 022. [刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2 016-2 022.]
- [40] Wang Jing'ai, Xu Xia, Liu Peifang. Land use and land carrying capacity in ecotone between agricultural and animal husbandry in north China[J]. *Resources Science*, 1999, 21(5): 19-24. [王静爱, 徐霞, 刘培芳. 中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究[J]. *资源科学*, 1999, 21(5): 19-24.]
- [41] Zhang Xinshi, Shi Peijun. Theory and practice of marginal ecosystem management—Establishment of optimized eco-productive paradigm of grassland and farming-pastoral zone of north China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1 137-1 138. [张新时, 史培军. 边际生态系统管理的理论与实践——我国北方草原与农牧交错带“优化生态—生产范式”构建[J]. *植物学报*, 2003, 45(10): 1 137-1 138.]
- [42] Kang Muyi, Dong Shikui, Huang Xiaoxia, et al. Ecological eegionalization of suitable trees, shrubs and herbages for vegetation restoration in the farming-pastoral zone of northern China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1 157-1 165. [康慕宜, 董世魁, 黄晓霞, 等. 北方农牧交错带植被重建中适宜乔、灌、草种的生态区划[J]. *植物学报*, 2003, 45(10): 1 157-1 165.]
- [43] Yuan Fei, Han Xingguo, Ge Jianping, et al. Net primary productivity of leymuschinensis steppe in Xilin River Basin of Inner Mongolia and its responses to global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2 168-2 176. [袁飞, 韩兴国, 葛剑平, 等. 内蒙古锡林河流域羊草草原净初级生产力及其对全球气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2 168-2 176.]
- [44] Fu Bojie, Lü Yihe, Gao Guangyao. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34(5): 261-272. [傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J]. *自然杂志*, 2012, 34(5): 261-272.]
- [45] Fang Jingyun, Yang Yuanhe, Ma Wenhong, et al. Carbon pool and its variation of grassland ecosystem in China[J]. *Science in China (Series C)*, 2010, 40(7): 566-576. [方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. *中国科学: C 辑*, 2010, 40(7): 566-576.]

## Integrative Modeling and Strategic Planning for Regional Sustainability under Climate Change

Wu Jianguo<sup>1,2,3</sup>, He Chunyang<sup>1,2</sup>, Zhang Qingyun<sup>4</sup>, Yu Deyong<sup>1,2</sup>,  
Huang Ganlin<sup>1,2</sup>, Huang Qingxu<sup>1,2</sup>

(1. Center for Human-Environment System Sustainability, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA; 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Climate change and land use/land cover change have resulted in water shortage, degraded ecosystem services, and increased disaster risks across the world. Developing strategies and measures for achieving regional and global sustainability in the face of these environmental problems is a key topic of current climate change research. This paper provides an overview of the 973 project, entitled “Integrative Modeling and Strategic Planning for Regional Sustainability under Climate Change”, including its background, relative progresses, key scientific

questions, major research elements, methodology, and expected outcomes. The proposed research is based on sustainability science, guided by the idea of Orderly Human Activities (OHA), and implemented through an integrated methodology of combining field observations, simulation experiments, and scenario analysis. The main objectives of the project are: to quantify the relationship between human activities and climate change, to assess the impacts of human activities on ecosystem services and human well-being in the face of climate change, and to develop an integrated model of climate change, OHA, and regional sustainable development. The ultimate goal is to provide a landscape/regional-scale strategy for sustainable development in the face of climate change. The project is expected to help advance the science and application of landscape sustainability science and land system design, particularly in terms of linking climate change, ecosystem services, and human well-being in the dryland region of China.

**Key words:** Landscape sustainability science; Land system design; Orderly human activity; Global climate change; Modelling.