

理解地理“耦合”实现地理“集成”

宋长青^{1,2}, 程昌秀^{1,2,3}, 杨晓帆^{1,2}, 叶思菁^{1,2}, 高培超^{1,2}

(1. 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; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:“耦合”作为物理学的经典概念,为许多学科提供了一套阐述多主体相互作用的思路和方法。“集成”不是来自特定学科,但因其高度的概括能力被广泛应用于自然和人文科学领域。地球科学是应用这两个概念最多的学科之一。地理学作为自然与人文交叉学科,具有区域性、综合性和复杂性特征。在使用耦合概念时,不同地理分支具有不同的理解,为此,地理学者有必要明确界定不同学科、不同情景下耦合概念的内涵,从而更准确地探索陆地表层格局、过程和机制。首先,从地理要素耦合、地理空间耦合、地理界面耦合、地理空间尺度耦合、地理关系耦合、地理耦合解译六个方面,对地理耦合的内涵进行全面解析和界定,并给出了相应的研究实践案例。其次,从地理学的视角认识理解集成,并以“黑河流域生态—水文集成研究”重大研究计划的地理实践为例,介绍实现地理集成的基本路径。最后,提出理解地理“耦合”与实现地理“集成”之间的联系。

关键词: 地理耦合; 地理集成; 生态—水文过程; 黑河流域

DOI: 10.11821/dlx202001001

1 引言

耦合作为物理学的经典概念是指两个或两个以上电路元件的输入与输出之间存在的紧密配合与相互影响,并通过相互作用从一侧向另一侧传输能量的现象。这一概念的核心是强调两个或两个以上独立单元的相互作用,并产生以物质为载体的能量交换过程。耦合为许多学科提供了一套阐述多主体相互作用的思路和方法。自20世纪80年代起,随着系统思维的不断深入,科学研究更加强调多要素之间的相互作用、多过程联系以及内在机制联动,故拓展后的“耦合”被广泛运用于自然科学、社会科学和人文科学领域。

地球科学是借用“耦合”最广泛的学科之一。自20世纪80年代起,随着地球科学分支的快速发展,科学界对地球各圈层产生了相当深入的认识。随着地球物理技术的发展,科学界对固体地球内部结构产生了飞跃的认识;随着深空技术的发展,科学界对多层大气过程有了充分的了解;随着深海技术的发展,科学界对海洋的行为有了全新的认识;随着对地观测技术的发展和对人类活动认识的不断加深,科学界对陆地表层各要素演化规律有了一定的了解。尽管人们对地球科学各领域的认识不断深入,但是,对将地球科学作为一个整体的运行规律还知之甚少。究其原因,是在解析地球整体行为过程中

收稿日期: 2019-04-19; 修订日期: 2019-12-19

基金项目: 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0608); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23100303)

[Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), No.2019 QZKK0608; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23100303]

作者简介: 宋长青(1961-), 男, 黑龙江人, 教授, 主要从事地理学研究范式、地理区域综合研究方法等方面的研究。

E-mail: songcq@bnu.edu.cn

缺少系统的、综合的思维和方法路径。为此国际地球科学界提出了地球系统的概念,科学家致力于发展地球系统科学学科,并建立了相应的地球系统科学研究机构。另一方面,倍受人类关注的陆地表层各要素研究也从单一过程走向系统思维过程,“人—地关系地域综合体”^[1]、“地球表层学”^[2]和“陆地表层系统”^[3-4]等概念被广泛提出。人们力图通过系统科学的方法揭示陆地表层系统的演化特征^[5]。

陆地表层系统是一个复杂、开放的巨系统,其自身禀赋的复杂性无法用传统系统科学的方法论彻底解析,因而需要综合运用归纳、推演、系统和复杂性的方法体系。诚然,无论相对简单的系统还是相对复杂的系统,其内部都存在固有结构和相互作用的组分,这是我们揭示系统本身的科学前提。基于这种认识,理解系统内在组分的耦合关系则成为解译、识别系统的关键环节。

2 地球科学 耦合 研究的科学实践

截至2018年7月,“耦合”一词被广泛地用于中国地球科学的各领域(表1)。从表1可知,地球科学的各领域都在不同程度地使用“耦合”;其中,地质学用的最多。最早追溯到20世纪50年代前后,其“耦合”概念基本遵循物理学的理解;例如,文献^[6]利用物理耦合原理研究爆炸讯号。其后,有研究利用耦合概念描述两个以上地质要素的作用关系,例如,盛茂等^[7]将裂缝性页岩气藏视为基质孔隙—裂缝双重介质,同时考虑岩石骨架变形对气体渗流场的影响,建立了页岩气藏流固耦合渗流模型。后来,部分研究利用耦合概念对复杂地质指标进行环境因子变化解析;例如,吕厚远^[8]利用孢粉资料,通过对应分析找出古环境因子,对地质时期的温度、相对湿度、绝对湿度、干燥度、蒸发力、降水量进行计算,得到较为理想的结果。由此可知,地质学研究中耦合的概念存在着较大差异,从传统物理学的理解、到地质多要素相互作用、再到耦合指标的解析均有不同的解释。不同的耦合概念具有不同的地质学含义。

表1 中国知网各种主题中出现“耦合”一词的文章数量(篇)

Tab. 1 Number of CNKI articles with the keyword "coupling"

	地质学	地球物理学	气象学	海洋科学	自然地理与测绘
全文	20421	8190	6983	4990	2793
摘要	10089	3833	3759	2549	1202
关键词	231	106	58	48	35

注:数据来源于中国知网统计结果,统计时间截至2018年7月。

在地球科学中,具有确切耦合含义的学科是大气学科。相对其它地球科学分支,大气科学以研究地球外层大气运动规律为主要目的。大气介质较地质体、地球表层环境要素和海洋水体,其空间异质特征不甚明显,因而可转换为更易理解的研究对象,并用牛顿定律进行表达和解释。在过去几十年中,科学家构建了不同区域尺度、不同时间尺度、包含不同要素过程的多种天气模式和气候模式。然而,地球外层大气运动不是独立、理想过程,而是严格受地球内外营力的约束和控制,同时受下垫面条件的影响。面对这些实际问题,耦合概念为大气科学研究提供了很好的思路。在具体研究过程中,大气科学不仅应强调大气运动的过程耦合,如物理过程与化学过程的耦合;更应强调大气边界与其下垫面耦合,如海气耦合、陆气耦合以及海陆气耦合等。由于大气科学研究已经进入模式化时代,耦合概念已经不是简单的理念、思路,已经发展为方法和工具被广泛应用。

3 地理耦合的内涵与研究实践

地理学是一门自然与人文交叉学科,具有区域性、综合性和复杂性特征^[9-10]。“耦合”在不同地理分支学科下有不同的理解,为此,地理学者有必要界定“耦合”在不同学科、不同情景下的内涵,将有助于更加准确地理解陆地表层格局、过程和机制。

地理学是以陆地表层自然和人文要素为对象,以时间、空间和尺度为核心特征的综合研究^[11],同时,地理学往往面对复杂综合指标的特征解析。因此,地理耦合的内涵可以从地理要素耦合、地理空间耦合、地理界面耦合、地理空间尺度耦合、地理关系耦合、地理耦合解译等方面进行解析和界定。

3.1 地理要素耦合

地理学关注的陆地表层是一个复杂系统,系统内部各要素发生紧密的相互作用,要素间不间断地进行着能量交换,大量的系统观测提供了多要素相互作用的事实,从而推动了系统的整体演化行为。这种基于动力学过程或统计学方法识别的多要素相互作用称之为地理要素耦合。

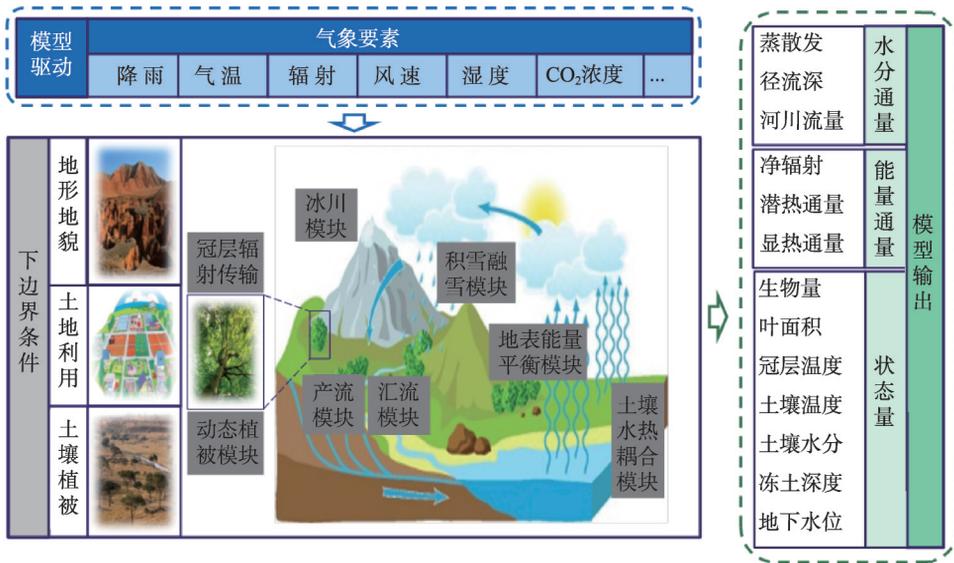
地理区域是一个多要素相互作用的系统,构成地理系统的各个要素在时间和空间发生着紧密的内在作用,集中表现为水分、土壤、生物和大气为载体的物质和能量的相互作用,以及在同一空间上,地理要素耦合作用并随时间演化的过程。黑河流域上游地区生态—水文耦合模型研究是地理要素耦合的一个很好例证^[12-13]。该模型以地形地貌、土地利用和土壤植被为下边界条件,以多种气象要素(如降雨、辐射、风速、湿度等)为驱动因子,以冰川、积雪、地表水文特征、植被动态、水分—土壤—植被系统热量传输为耦合对象,实现了水分通量、能量通量和状态量的模拟输出,如图1所示。黑河流域上游区域生态—水文模型多要素耦合研究基本是在大量观测数据基础上,遵守物质和能量平衡原理,构建的动力学模型,对典型的流域上游生态—水文过程动力学过程进行解译;当然研究中也存在一些以统计方法为主体的模型构建,基于统计方法的耦合仅从要素的数量、相关关系上解释各要素的耦合,不能直接反映其动力学联系。此外,刘海猛等^[14]也探讨了城镇化与生态环境系统中自然要素与人文要素间复杂、交叉的耦合关系。

3.2 地理空间耦合

地理空间耦合是地理学区域研究的重要内容之一。区域划分遵循地理要素的差异性原则,如何建立区域联系、整合多区域系统是地理学研究的命题之一。通过建立区域间物质输入与输出的平衡关系,可实现区域核心要素的空间联系,为理解多区域特征提供可能。这种通过区域间相互作用的物质联系,解译区域边界缝合的方法可称之为地理空间耦合。

地理学研究的特征之一是解决均质和异质空间的特征描述、变化规律及形成机制。对同质空间而言,更多强调其自然和人文特征的一致性,以及同质特征的空间分布范围、多要素相互作用过程的一致性、驱动机制的一致性。对异质空间而言,更多强调其自然和人文特征的差异性、变化规律的差异性、以及造成空间差异的动力学基础。地理学研究常常要处理异质空间的关联关系,随着研究区域的扩大,这种异质空间的边界关系就变得更加多样和复杂。在地理学的耦合研究中,经常采用地理空间耦合的方法处理异质空间边界的关联问题。

中国西部干旱内陆河流域研究是流域上游与中下游区域水文过程空间耦合的一个很好例证。上游区域为高山草甸和高山森林区域,其水分形式以大气降水、冰川和积雪融水补给为主;故在上游流域水文过程的研究中,需要统筹考虑大气降水、冰川和积雪融



注：引自黑河流域生态—水文集成研究重大研究计划总结报告,由杨大文教授提供。

图1 黑河流域上游生态—水文集成模型的多要素耦合

Fig. 1 Multi-features coupling in ecological-hydrological integrated model in the upper Heihe River Basin
(From the summary report of the major research project on ecological-hydrological integration research in the Heihe River Basin, provided by Professor Yang Dawen)

水、冻土融出水以及生态过程对水文时空过程的影响,针对性的研发地表水文过程模型。中下游区域缺少大气降水,主要由上游地区地表水和地下水补给为主,故在中下游流域水文过程的研究中,需要以地表河道径流和地下水过程为主,统筹考虑地表蒸发、地层和岩石特征等因素对水文过程的影响,针对性地研发刻画地表水和地下水互动的水文过程模型。

由于上游与中下游异质特征导致的水文过程与水分行为的差异,开发了功能与特征不同的模型工具。但是,作为一个完整的内陆河流域,水文过程存在着不可分割的内在联系,为此,在黑河流域研究中通过建立区域水量平衡关系,即将上游水量输出作为中下游水量输入,构建了以水量为代表的物质平衡的空间耦合思路。

3.3 地理界面耦合

地表关键带概念的提出,进一步拓展了地理学研究的垂直空间,研究发现从岩石风化壳表层、土壤层、植被层到大气层多界面频繁地进行着物质和能量交换,从而驱动着陆地表层系统的特征演化。这种基于多介质界面的相互作用称之为地理界面耦合。

陆地表层系统是一个多介质相互作用的系统,同一介质也存在着赋存形态的差异,因而形成各种水平空间和垂直空间的多种界面,如土壤与植被界面、大气与土壤界面、地表水与地下水界面,围绕这些界面进行着物质和能量的交换。由于界面过程是陆地表层系统中作用过程复杂和活跃的区域,选择恰当的对象开展界面耦合研究是认识和理解陆地表层过程的有效手段。黑河流域中下游区域地表水与大气的耦合过程、地表水与地下水耦合过程都是地理界面耦合的典型例证。通过地表水与地下水模型耦合研究,可以发现黑河流域中下游地区地表水与地下水交换通量,以及在不同子区域的差异。

3.4 地理空间尺度耦合

地理学是一门基于多尺度研究的科学,不同的空间尺度所表达的地理对象要素的多

寡、格局的复杂程度、变化过程和演化的驱动因子都有所不同。在多数研究中,存在着多尺度套叠现象,为此,科学家探索了各种尺度转换、尺度融合的方法。这种在同一区域开展多尺度研究的方法称为地理空间尺度耦合。

地理学是一门严格受尺度约束的学科,关于地理尺度的理解是一个非常复杂的问题,简单可以理解为空间和时间的长度和间隔。不同尺度的地理学问题存在不同主导要素内容、不同的测度指标体系、不同的驱动因素、不同的演化速率和方式等。在实际研究中,往往会遇到多尺度问题,其主要表现在要素、指标、因素等跨尺度耦合效应。从图2基于行政边界划分的多尺度耦合示意图可以看出,尺度之间存在着叠加关系,不同的空间尺度,具有不同的地理学问题。当然,这样一个例子不足以表达地理尺度的全部内涵。

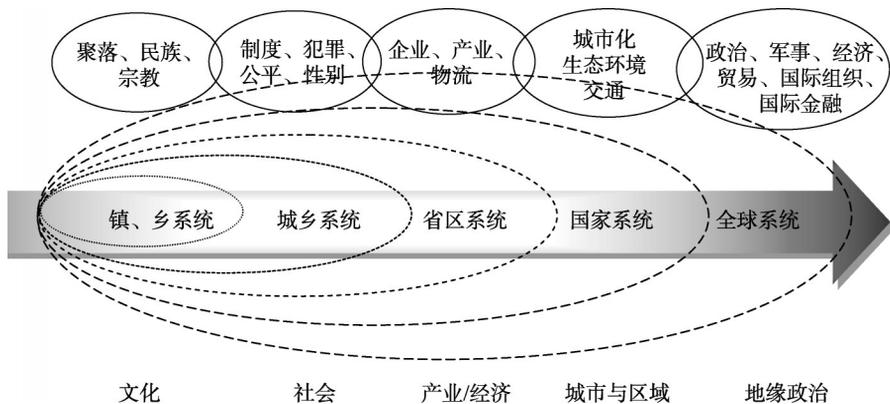


图2 不同地理空间尺度耦合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geographic coupling at different spatial scales

3.5 地理关系耦合

从耦合概念的广义特征出发,地理学研究常将两个或两个以上具有遥相关意义的地理变量(如区域旅游人口数量与GDP的关系)进行统计分析,这种建立间接的不具有物质与能量联系的地理变量关系的研究称之为地理关系耦合。

在地理学研究的社会、经济现象中,许多要素存在非严格的对应关系,即无法将所涉列的要素概括为绝对的内在联系,或者说经济学上的投入—产出关系。往往建立指标的统计学关系,表达指标可能存在的内在联系和相互驱动关系,实际上形成了松散的关系耦合。Liu等^[15]以张家界、黄山和三亚为案例,建立旅游业与资金投入的耦合关系,阐述了2000—2016年旅游业与资金投入的耦合关系变化过程。这项研究在一定程度上刻画了二者的关系,但是,事实上旅游业的发展不仅与资金投入有关,可能还与旅游资源本身和管理措施等有关。

3.6 地理耦合解译

从真正的实验地理学开始至今仅百余年的历史,从系统的文献记载不过千余年的历史,为了研究更早的地理变化规律,科学界不得不利用地层记录开展研究。地层记录分析、测量的指标相对较少但富含综合信息。如地表植被是当地水分、热量、土壤综合作用的结果,而地层中的孢粉特征则是当时水分、热量、植被、土壤等综合作用的结果,因而,通过地层孢粉数据分析可解译出不同要素的变化特征^[16]。这种利用综合指标解析独立因子变化的思路称之为地理耦合解译。

现代地理学研究主要依赖于大量的自然地理要素观测和人文地理要素统计数据,对于长时间尺度的研究可采用文献记载、考古和地质记录来完成。由于长时间尺度的记录往往不能识别现代地理学研究的独立要素,所获得的记录更多是定性、间接、综合的指标,如文献记载的冷与暖;地质记录中有机碳含量等。简单地用这些指标无法获得长时间尺度的自然和人文地理环境的变化特征。事实上,这些指标本身就耦合了多种地理要素相互作用而产生的共同结果,为此,耦合解析则成为地理学长时间尺度研究的重要工具。刘嘉麒等^[17]从地层剖面中测得沉积物样品1万年以来的干密度,沉积物干密度受气候变化的制约,气候变化则受不同周期的气候控制因素影响。因此,可以理解为近万年来干密度变化受多个周期气候因素控制,分离、解译不同尺度的气候控制周期的过程则是耦合解析,利用快速傅立叶变换(FFT)的方法从干密度(气候)曲线中分离出2930 a、1140 a、490 a、250 a和220 a中心周期成分,可以了解每个周期的幅度、在时间上的分布、变化趋势等,通过耦合解析可以理解不同时段干密度变化的主要气候周期(图3)。

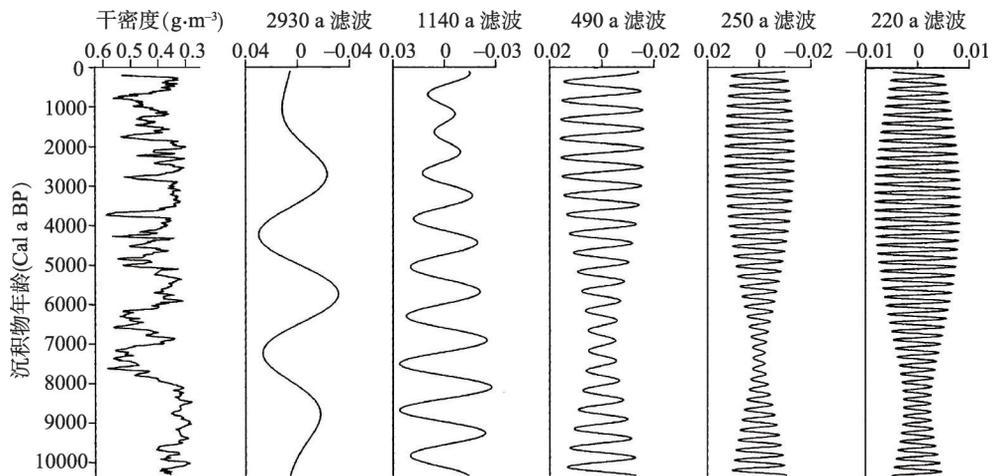


图3 湖光岩玛玕湖全新世以来的气候变化及其主周期成分的波动趋势^[17]

Fig. 3 Climate change since the Holocene of Huguangyan Maba Lake and the fluctuation trend of main components^[17]

4 地理集成的基本路径

尽管集成概念在科学上尚无统一的定义,但在地理学研究中已被广泛使用,且在地理区域实践中发挥着重要的作用。本文力求从地理学的视角对集成加以认识,在地理实践研究中介绍其具体使用途径。

4.1 地理集成的狭义理解

与“耦合”概念相比,“集成”不是来于特定学科,而是泛指一些孤立的事物或元素通过某种方式改变原有的分散状态,集中在一起并产生联系,从而构成一个有机整体的过程。根据以往各学科使用情况,可从3个方面理解其内涵:由分散个体整合为有机整体、针对不同学科具有明确的整合平台、针对不同对象具有明确的整合方式。由于集成概念具有高度的概括能力,无论自然科学还是人文科学都在广泛地使用这一概念。地球科学是应用这一概念最多的领域之一,尤其在地理学分支中应用最为广泛。截至2018年7月,在中国知网的自然地理与测绘领域的文章中,全文、摘要和关键词出现“集成”的文章分别有20714篇、6499篇和239篇,居地球科学各分支之首(表2)。

在地理学研究中,“集成”整合的对象为同层级^①的自然和人文地理要素;整合的平台多为特定尺度的研究区域;整合的方式一般以研究工具进行表达,如通过模型工具进行整合。尽管如此,各学科对集成内涵的理解尚存在不同,地球科学各分支,以及地理学内部的理解也不统一。但是,不可否认通过要素模型进行整合是目前最为有效的方式之一。

4.2 黑河流域生态—水文—经济集成研究实践

黑河流域是中国西北地区第二大内陆河流域,发源于甘肃祁连山脉、终止于内蒙古居延海,流域面积约为14万km²。从构造上形成了典型的山盆结构,由于地形高差大,形成了自山地向盆地过渡的高山草甸、高山森林、盆地绿洲、干旱荒漠以及干旱内陆湖泊的地理结构特征。干旱气候特征造成特定的流域水文过程,同时形成水资源短缺的现状。从地区资源、生态和社会经济发展的角度出发,国家自然科学基金委员会设立了“黑河流域生态—水文集成研究”重大研究计划(以下简称“黑河计划”),旨在通过生态—水文—经济集成研究,平衡水资源使用效率,从而为区域生态、生产和生活用水提供科学决策支持^[18-19]。“黑河计划”以系统思维为主线,以集成研究为路径,以决策支持为目标。突破传统典型代表性的工作模式,构建系统的数据观测平台,实现全区域网格数据制备;力图从机理上认识生态、水文、经济等过程;开发具有时空表达能力的多重模型系统;最终建立具有实际目标和影响设定的决策支持系统(图4)。



图4 黑河流域生态—水文—经济集成研究思路框架

Fig. 4 The framework of ecological-hydrological-economic integration research in the Heihe River Basin

4.2.1 通过网格化数据制备建立多要素集成的数据基础 地表系统研究的基础是多元功能地理要素数据的获取,与典型研究有所不同,系统研究需要区域的全覆盖,为此,多要素、高分辨率、网格化数据的制备成为系统集成研究的客观要求。在“黑河计划”研究中,针对模型需求对流域数据采集进行了有效分类。① 精细化地制备模型本底数据,如土壤、植被、地貌数据,并按需求进行网格化^[20];② 通过区域气候模型制备模型驱动数据,如气象、气候因子数据;③ 通过实际观测和统计、调查制备相互作用的模块化数据。由于数据性质和功能不同,采取不同的数据采集方式、制备方法,并确定其时空特征和集成功能(表3)。

表3 黑河流域生态—水文—经济集成研究格网数据的制备

Tab. 3 Preparation of grid data for ecological-hydrological-economic integration research in the Heihe River Basin

数据类型	土壤、植被	水热因子	气象、气候因子	经济
采集方式	采样、观测	航空、卫星遥感	气候模型	统计、调查
制备方法	空间模拟	模型反演、地面实验	模型模拟	空间模拟
时空特征	低分辨率	中分辨率	高分辨率	空间定位
集成功能	区域本底	模型参数	模型驱动	资源平衡

① 一般而言地理要素具有分级特征,另有他文论述地理要素的分级特征。

4.2.2 通过构建多要素模型建立多过程集成的工具 模型是表达地表变化过程的工具。地表过程的本质认识与准确表达的模型是实现集成的科学基础。“黑河计划”研究为刻画流域内自然和人文要素的时空变化特征，建立了一系列单要素模型；为刻画自然和人文要素的相互作用建立了一系列耦合模型；最后，基于单要素过程模型和多要素耦合模型建立了具有表达区域水文—生态—经济要素关系的集成模型（图5）。

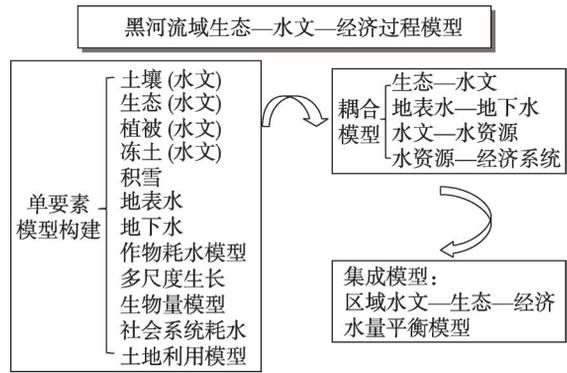
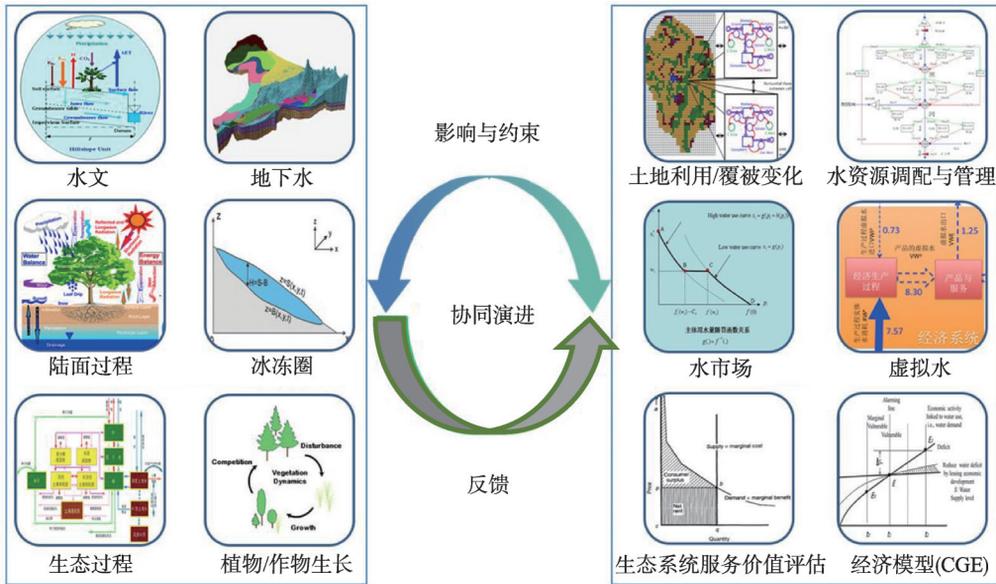


图5 黑河流域生态—水文—经济过程模型
Fig. 5 Eco-hydrological-economic process model in the Heihe River Basin

作为一个典型的干旱区内陆河流域，黑河流域几乎含盖了所有的陆地表层系统自然和人文要素。集成模型的构建力图达到如下3个目标（图6）：① 通过黑河流域核心要素的模块式表达，深刻理解环境要素的变化规律和相互作用关系。在黑河流域先后构建了自然要素模型，例如分布式水文模型、冰冻圈（冻土、积雪、冰川）水文模型、三维地下水—地表水耦合模型、作物生长模型、荒漠植物生长模型、陆面过程模型等，以及社会经济系统模型，例如土地利用模型、水资源模型、水市场模型、虚拟水模型、生态系统服务模型和水经济模型等。② 通过集成将要素模块进行有机结合形成模型，理解流域系统的整体演化规律。黑河流域集成的流域系统模型力求同时考虑对自然和社会经济两大系统进行整合，从而形成自然—社会系统双向耦合、反馈、协同演化的流域系统模型。③ 创建具有目标决策能力的支持系统，发展集成模型的区域管理能力。黑河流域



注：来源于黑河流域生态—水文集成研究重大研究计划总结报告，由李新研究员提供。

图6 黑河流域系统模型的总体目标及框架

Fig. 6 The goal and framework of the integrated model in the Heihe River Basin

(From the summary report of the major research project on ecological-hydrological integration research in the Heihe River Basin, provided by Professor Li Xin)

集成模型对流域水资源利用效益进行评估,同时,在不同情景水资源分配条件下,通过以集成模型为基础的决策系统可对整体流域能力进行高质量的评估。

综上所述,集成研究是一项复杂的系统地理学工作,从“黑河计划”研究经验可以发现,首先,集成研究应明确目标,目标的制定决定了参与集成要素的选择,围绕集成目标和与目标相关联的多要素连动体系,成为选择要素的依据。其次,集成研究的关键是地理过程的认知和表达程度,过程认知准确程度是高质量集成的基础,准确的模型表达是实现集成的重要工具,以此为基础的集成才有可能为目标决策提供切实可行依据。

5 结论

地理耦合是一个基于不同层次的科学概念,针对不同的问题被理解为研究思路、研究方法或研究工具。其主要目的是通过不同层次的耦合,实现对地理过程的本质理解。到目前为止,通过模型工具表达地理耦合过程是地理过程研究的前沿方向,也是解决集成研究的核心基础。高质量集成研究的基础是对地理耦合的深刻理解,通过多重模型的链接是实现集成的有效途径。集成目标的确定、集成数据的整合是实现地理集成的基本前提。耦合与集成是开展地理综合研究不可偏废的两个方面,地理耦合过程的认知程度决定着地理集成的层次和质量,地理集成的水平决定了对地理区域综合特征的理解与表达,进而影响对地理系统演化规律和驱动机制的认识。

致谢:衷心感谢北京大学杨大文教授、中国科学院青藏高原研究所李新研究员提供的图片。

参考文献(References)

- [1] Fan Jie. "Territorial System of Human-environment Interaction": A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607. [樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. *地理学报*, 2018, 73(4): 597-607.]
- [2] Pu Hanxin. The Chinese Geographical Society held a symposium in Beijing to discuss the Earth's surface and quantitative geography advocated by Professor Qian Xuesen. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(3): 289-290. [浦汉昕. 中国地理学会在京召开座谈会讨论钱学森教授提倡的地球表层学与数量地理学. *地理学报*, 1985, 40(3): 289-290.]
- [3] Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun, et al. Division of the Terrestrial System in China: A case study from Huang's theory on terrestrial system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 1-6. [葛全胜, 赵名茶, 郑景云, 等. 中国陆地表层系统分区: 对黄秉维先生陆地表层系统理论的学习与实践. *地理科学*, 2003, 23(1): 1-6.]
- [4] Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, Yin Yunhe, et al. Continuation and innovation of integrated studies in physical geography. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1484-1493. [吴绍洪, 赵东升, 尹云鹤, 等. 自然地理学综合研究理论与实践之继承与创新. *地理学报*, 2016, 71(9): 1484-1493.]
- [5] Huang Bingwei. On earth system science and sustainable development strategy (I). *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(4): 350-354. [黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略科学基础(I). *地理学报*, 1996, 51(4): 350-354.]
- [6] 2200 Team, 2111 Team, 646 Factory. Requirements for explosive signals. *Oil Geophysical Prospecting*, 1972(7): 68-69. [六四六厂2200队、2111队. 对爆炸讯号的要求. *石油地球物理勘探*, 1972(7): 68-69.]
- [7] Sheng Mao, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Hydro-mechanical coupling model of shale gas reservoir and its finite element analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(9): 1894-1900. [盛茂, 李根生, 黄中伟, 等. 页岩气藏流固耦合渗流模型及有限元求解. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(9): 1894-1900.]
- [8] Lv Houyuan. The sporo-pollen assemblages in the sediments in the south Bohai Sea since the late Pleistocene and its paleo-environment analysis. *Advances in Marine Science*, 1989(2): 11-26. [吕厚远. 渤海南部晚更新世以来的孢粉组合及古环境分析. *黄渤海海洋*, 1989(2): 11-26.]
- [9] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era.

- Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189-1198. [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1198.]
- [10] Cheng Changxiu, Shi Peijun, Song Changqing, et al. Geographic big data: A new opportunity for geography complexity study. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(8): 1397-1406. [程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇. 地理学报, 2018, 73(8): 1397-1406.]
- [11] Song Changqing. On paradigms of geographical research. Progress in Geography, 2016, 35(1): 1-3. [宋长青. 地理学研究范式的思考. 地理科学进展, 2016, 35(1): 1-3.]
- [12] Yang Dawen, Gao Bing, Jiao Yang, et al. A distributed scheme developed for eco-hydrological modeling in the upper Heihe River. Science China Earth Sciences, 2015, 58(1): 36-45.
- [13] Gao Bing, Yang Dawen, Qin Yue, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. The Cryosphere, 2018, 12(2): 657-673.
- [14] Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Li Yonghong. The coupled human and natural cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8): 1489-1507. [刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架. 地理学报, 2019, 74(8): 1489-1507.]
- [15] Liao Kaicheng, Yue Mingyue, Sun Siwei, et al. An evaluation of coupling coordination between tourism and inance. Sustainability, 2018, 10: 2320.
- [16] Song Changqing, Lu Houyuan, Sun Xiangjun. Construction of pollen-climate factor transfer and its application in North China. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(20): 2182-2185. [宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 中国北方花粉—气候因子转换函数建立及应用. 科学通报, 1997, 42(20): 2182-2185.]
- [17] Liu Jiaqi, Lv Houyuan, Negendank J, et al. The periodicity of Holocene climate fluctuations in Huguangyan Lake. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(11): 1190-1195. [刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性. 科学通报, 2000, 45(11): 1190-1195.]
- [18] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Fu Bojie, et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin. Advances in Earth Science, 2014, 29(4): 431-437. [程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(4): 431-437.]
- [19] Song Changqing, Yuan Lihua, Yang Xiaofan, et al. Ecological-hydrological processes in arid environment: Past, present and future. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(12): 1577-1594.
- [20] Li Xin, Jin Rui, Liu Shaomin, et al. Upscaling research in HIWATER: Progress and prospects. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 921-932. [李新, 晋锐, 刘绍民, 等. 黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻. 遥感学报, 2016, 20(5): 921-932.]

Understanding geographic coupling and achieving geographic integration

SONG Changqing^{1,2}, CHENG Changxiu^{1,2,3}, YANG Xiaofan^{1,2}, YE Sijing^{1,2}, GAO Peichao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Coupling, as a classic physical concept, provides a suite of ideas and methods for describing interactions of multi-agents across disciplines. In contrast, the concept of integration is not from a certain discipline, but it is widely used in many natural and socioeconomic sciences fields due to its great generalization capacity. Both concepts are frequently mentioned in Earth science. Geography, as a multi-disciplinary research area between natural and socioeconomic sciences, owns regional, comprehensive, and complex characteristics. The understanding of coupling varies across geographic sciences. This paper presents an advanced understanding from six geographic perspectives based on different disciplines and scenarios, which is helpful to accurately explore patterns, processes, and mechanisms of land surface system. Firstly, this paper clarifies six perspectives on geographic coupling, and presents corresponding research cases, which include geographic spatial coupling, geographic features coupling, geographic interfaces coupling, geospatial scale coupling, geographic relationship coupling and geographic coupling interpretation. Secondly, the paper interprets the concept of integration from a geographic perspective, and introduces a pathway to achieving an integration in Heihe River Basin's research practice. Finally, the paper proposes intrinsic connections between geographic coupling and geographic integration.

Keywords: geographic coupling; geographic integration; ecological-hydrological processes; Heihe River Basin