

时空信息的基本内涵与赋能机理

刘万增^{1,2}, 陈军^{1,2}

(1. 国家基础地理信息中心, 北京 100830; 2. 自然资源部时空信息与智能服务重点实验室, 北京 100830)

摘要: 时空信息赋能是充分释放和放大时空信息作为生产要素的价值, 助力经济社会各领域的高质量发展的时代需求。当前时空信息赋能的基础研究还相对薄弱, 应用即赋能的观点占主导地位, 缺乏对时空信息赋能机理的深层次认知和探究, 导致时空信息的内涵与外延不清, 时空信息赋能的内在机理不明, 制约着其科学高效赋能, 亟需厘清其基本内涵、赋能机理与赋能模式等。本文针对时空信息赋能问题, 梳理了时空信息的基本概念、丰富内涵和基本特征; 指出熵是时空信息赋能的物理基础, 熵减是时空信息赋能的内生动力; 时空信息赋能的本质是以时空信息为载体, 以负熵流转为动能, 以不确定性转化为特征, 通过人、机、物(环境)相互影响、相互作用, 实现系统结构优化、效能提升的过程; 并提出了时空信息作为自在信息直接赋能、作为自为信息间接赋能、转为时空知识倍增赋能3种模式; 最后, 探讨了时空信息赋能自然资源高质量发展的路径。

关键词: 时空信息; 高质量发展; 赋能; 机理; 信息熵; 国土空间

DOI: 10.11821/dlxb202405001

1 引言

时空信息是国家重要的战略性信息资源和核心生产要素, 是新型信息基础设施的重要组成部分, 在国家和地方的高质量发展中发挥着不可或缺的重要作用^[1]。随着中国数字政府、数字社会等国家战略的深入推进, 管理决策部门基于多源时空信息, 采用人工智能、大数据分析等技术, 挖掘决策管理需要的时空知识, 辅助其对决策问题的理解和判断, 从而优化决策目标, 完善决策流程, 提升决策质量, 评估决策效果, 使被动式、粗放式、经验式的时空问题处理升级为主动化、精细化、智能化的时空智能决策^[2-8]。时空信息赋能, 正日益成为数字化时代国家治理能力现代化的新范式。

时空信息赋能是充分挖掘、释放和放大其作为生产要素的价值, 与经济社会发展各领域业务进行有效融合, 形成用时空信息说话、在三维空间研判、凭科学事实决策的数字化治理新模式, 有效助力经济社会各领域的高质量发展^[1-2, 9]。实现时空信息高效率赋能, 需要厘清其基本内涵, 揭示其赋能机理, 明晰其赋能模式, 指出其赋能途径。但当前, 国内外相关研究多针对大数据赋能、信息化赋能^[10-19], 有关时空信息赋能的研究多集中在应用领域, 应用即赋能的观点占主导地位, 缺乏对时空信息赋能机理的深层次认知

收稿日期: 2023-07-26; 修订日期: 2024-03-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42394062); 国家重点研发计划(2022YFB3904205); 湖北珞珈实验室开放基金资助项目(220100037) [Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No.42394062; The National Key R&D Program of China, No.2022YFB3904205; The Open Fund of Hubei Luojia Laboratory, No.220100037]

作者简介: 刘万增(1970-), 男, 河南长葛人, 正高级工程师, 研究方向为时空信息计算与知识服务。

E-mail: luwnzg@163.com

和探究,导致时空信息的内涵与外延不清,赋能的内在机理不明,制约着其科学高效赋能,显然当前时空信息赋能的基础研究还相对薄弱,明显滞后于实践。近年来时空信息赋能问题逐步引起国内学术界和产业界的关注和重视。2023年11月中国测绘学会学术年会举办了多场“时空信息赋能高质量发展”技术研讨会,来自政府部门、学术界、产业界的专家学者,共同研讨时空信息赋能国家高质量发展的战略需求、技术前沿、赋能路径与创新发展方向。自然资源部专门成立了时空信息与智能服务重点实验室,支持创立了系列学术期刊,全面推动时空信息相关研究和应用工作。在学术研究方面,陈军等解析了自然资源时空信息的技术内涵,提出了以“全面动态感知、系统精准认知、全域智慧管控”为主线的总体发展思路^[9];并围绕时空信息赋能高质量发展,讨论了数字化赋能、全局化赋能和时空型赋能的基本概念,分析了时空信息赋能的基本方式及面临的问题,指明了时空信息赋能高质量发展的方向^[20]。

总体而言,该领域的研究方兴未艾,仍有许多科学问题尚待解决,如对时空信息的科学内涵研究还不够深入,对其赋能机理的研究仍是空白等。从发展的角度看,时空信息赋能是数字化转型发展时代测绘地理信息领域面临的新的技术挑战,蕴含了丰富的多学科交叉的理论问题,需要相关领域的科技工作者的通力合作与长期努力才能有效解决。

本文主要针对时空信息赋能机理,综合物理学、哲学和信息论的观点,试图厘清时空信息的基本概念、科学内涵及其主要特性;从时空信息熵的角度浅析时空信息的赋能机理,基于时空信息的3种形态,探究时空信息赋能的基本模式,并提出时空信息赋能自然资源管理的可能路径。

2 时空信息内涵

随着信息技术的飞速发展,人类正从原来的二元空间进入由社会空间、物理空间和数字空间构成的三元空间^[21-23]。时空信息是通过对现实世界物理空间和社会空间感知、认知,形成的对现实世界物质运动、人类活动及其相互作用等的确定性描述或信息化表征。

2.1 时空信息概念

时空理论是物理理论的基础^[24-25]。时空是物质运动的存在形式,由时间、空间、实体、运动、结构、关系、事件、能量等构成^[26-30]。哲学上将信息定义为“物质存在方式和状态的自身显示”^[31],信息论认为信息代表着消除了的不确定性^[32]。信息和物质、能量一样,被认为是人类社会赖以生存、发展的三大基础^[33]。由此可知,广义的时空信息是指物质存在、运动及其相互作用的不确定性描述。在这里,信息与时空紧密相关,信息是关于时空的信息,时空确定了信息的边界,信息表征了时空的内容,没有时空就没有信息,信息与时空同在。

狭义的时空信息则是基于统一的时空参照系,在特定的时间和空间,对现实世界实体或系统的空间结构、存在形态、运动状态、相互作用、功能效应等的确定性描述。这里实体包括现实世界客观存在的地理环境、自然资源、动物、植物、人类、各种人工设施、仪器、设备等。从概念上讲,时空信息有语法、语义、语用3个层次^[34],存在自在信息、自为信息和再生信息3种形态^[35]。

由于时空信息描述的对象是物理空间和社会空间的客观存在,一条完整的时空信息通常包括4个要素,即时间、空间、实体(系统)、事件(特性、运动、结构、关系、作用、功能)等,如“昨天(时间)小X(实体)出差(事件)了”,这里虽然没有显性地表征空间,但小X是实体,存在于某个位置的空间,小X出差也意味着作为实体的小X的空间的转换。

2.2 时空信息基本特性

从哲学上分析, 时空信息的存在依赖于物质^[34]。现实世界实体或系统的空间结构、存在形态、运动状态及其相互关联、相互作用的关系蕴含并承载着时空信息, 是时空信息存在的原生状态; 继而, 通过时空转化将其固化为物质结构的编码, 表征其产生及发展的历史, 从而将时间、空间和信息凝结为“时空信息体”^[36], 如树木的年轮的圈层结构和形态记录着树木生长的历史信息, 光盘作为存储介质则可将时空信息转换成二进制0和1不同排列的结构编码, 进而映射成光盘上坑点和平面分布的组合来存储时空信息。因此, 从理论上讲, 时空信息是以物质结构的有序编码进行存储, 通过文字、符号、图形、图像、声音、动作及其有效组合进行表达, 以电磁波、光波、声波、磁介质、纸介质等为载体进行传播^[37]。

从时空信息的概念分析, 其具有以下6个特征: ① 动态性: 动态性是时空信息的基本特性。现实世界的各类实体都是处于不断变化之中, 不断产生新的不确定性, 从而产生更多的时空信息。② 尺度性: 从不同的尺度观测现实世界, 会得到不同的时空信息: 包括时间尺度、空间尺度、语义尺度等。③ 多维度: 从不同视角观测现实世界, 会得到反映不同角度的时空信息, 因此时空信息具有明显的多维特征。④ 传播性: 时空信息是通过各种物质媒介进行存储和传播, 具有高渗透性和高融合性, 时空信息传播离不开物质和能量。⑤ 共享性: 时空信息不具有独占性、排他性, 可以共同拥有。⑥ 赋能性: 时空信息是负熵, 具有赋能禀性。

2.3 时空信息观测

时空信息观测的目的是消除不确定性(图1), 是根据特定需求, 基于时空参照系, 通过感知、认知、计算、推理等, 将现实世界时空对象、时空现象、时空事件等的不确定性转化为确定性有价值的时空信息的过程。卫星测绘、国土调查、科学考察等, 实际上都是通过现实世界的感知和认知, 从而消除对现实世界认识的不确定, 来获得时空信息^[38]。从时空信息的定义可知, 时空信息描述的对象是物质及其存在或运动的状态, 是一种客观存在, 不管是否被观测, 是否被感知到它的存在, 它都是存在的^[39]。但是, 其确定性却是由观测决定的, 只有被观测, 其不确定性才被消除, 才会产生时空信息。时空信息一旦产生, 就是一种客观存在^[31]。如同样一条时空信息, 甲观测了, 对甲就是确定的, 乙没观测, 对乙就是不确定的, 但并不影响该时空信息的客观存在性, 乙可以通过共享或者观测来获得时空信息, 消除不确定。但由于认知的局限性, 人们所感知或认知的时空信息会存在一定的偏差, 不排除其内容存在一定的主观性, 甚至会出现错误的时空信息。时空信息的确定性由观测时的时间、空间、实体及其运动、结构、关系等内容共同确定, 任何一项内容发生变化, 时空信息的确定性就可能发生变化, 因此严格地讲, 很难通过不同时间的观测来获得完全相同的时空信息。

时空信息的观测过程需要消耗物质、能量和信息资源^[40]。人们一般按需选择观测时点、观测空间、观测对象、观测要素、观测尺度、观测维度等, 确定合适的观测模式进行观测, 以降低观测成本, 提高观测效率, 如自然资源调查监测、林业调查、地质调查、水利普查等专项观测活动。其缺点是观测的整体性、系统性、协同性不足, 不可避

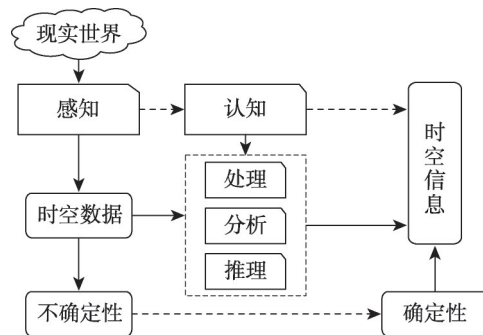


图1 时空信息观测

Fig. 1 Spatio-temporal information observation

免地会出现数据标准不统一、统计口径不一致、尺度和精度不协调等,导致数据适用性不高、共享性不强、流通性不畅、时空信息赋能能力不足等问题^[1]。因此,基于统一观测时点、统一观测空间、统一观测尺度、统一信息模型,探索一测多用的技术模式成为近年来业界研究的热点问题^[41-42]。

2.4 时空信息度量

从信息的概念分析,现实世界的某个系统单元,存在的不确定性越大,其蕴含的信息量也越大,消除这些不确定性消耗的能量也越多;对观测而言,其消除的不确定性越多,获取的信息量也越大。在社会系统中,信息熵在数学含义上等同于热力学熵^[43],一般采用香农熵来度量信息^[34, 44]。

需要指出的是香农熵设计的初衷是为度量通讯信号的信息量,其仅考虑信号中不同成分的占比,难以度量时空信息在组分、结构、分布、关联等方面的不确定性,因而,越来越多的学者,转而采用玻尔兹曼熵来度量时空信息,并在模型和算法上取得了突破性进展,成功应用于景观生态学研究 and 遥感图像处理^[43, 45-46]。

然而无论是香农熵还是玻尔兹曼熵,其度量的是实体或系统蕴含的不确定性的期望值大小,是一种潜在的信息量,而不是观测后得到的实际信息量,但总的趋势是:系统存在的实体类型越复杂、运动变化越纷乱、相互作用越明显,其不确定性越大,熵也越大,相应地,蕴含的信息也越多。由于现实世界的时空现象纷繁多样,具有千姿百态的几何特征、多维动态的时空分布、错综复杂的空间关系、无所不在的相互作用,蕴含了极其丰富的时间、空间、状态及其相互关系等的不确定,决定了相对于一般的地理信息,时空信息蕴含的信息量要大得多。但时空信息数据量和实际有效信息量不一定总是正相关,冗余信息、不一致信息越多,反而增加新的不确定,导致信息熵的增加,造成实际有效信息量的减少。

2.5 时空信息质量

时空信息的质量包括时空信息的可靠性、准确性、正确性、完整性、价值性等。时空信息的可靠性是指时空信息的形成、产生、来源是否客观、权威、可靠;准确性是指对时空信息的主体、时间、空间及内容的描述或表达是否准确,或时空信息传播过程的保真或损失程度;正确性是其时空主体、时间、空间及内容是否正确地反映了客观现实或揭示了客观规律^[45];完整性是指时空信息的构成要素是否完整以及信息描述内容的完备程度;价值性则是时空信息可发挥的作用、可利用的价值或赋能能力。时空信息的可靠性、准确性、正确性、完整性属于语义的范畴,而时空信息的价值性属于语用的范畴,与时空信息的获取代价、信息正确性及其描述对象、空间位置、空间范围、获取时点、信息内容等有关。

3 时空信息赋能机理

赋能的概念最早来自心理学,是指通过言行、态度、环境的改变给予他人以“正能量”的过程^[6]。管理学认为赋能是通过组织的扁平化释放权力,最大限度发挥个人才智和潜能^[15]。时空信息赋能则是时空信息赋予个人、组织、智能体或系统能力提升的过程,通过自组织、自调节,从无序到有序,达到结构稳定、功能完善、性能优化的过程。

3.1 熵是时空信息赋能的物理基础

熵是度量复杂系统的核心指标。熵增是一切事物发展的客观规律^[47-48]。由于熵描述的是系统结构关系的组构和分布方式^[49],因此熵的改变意味着系统要素的组构、匹配、分

布方式与状态的改变;从社会物理学的角度看,人类的实践活动同样遵从熵增定律,没有外部规则的约束,人类行为总是倾向于一种自发的无序状态(熵增)^[50];对某一生命个体而言,如果不与外界进行物质、能量和信息交换,则其必然处于无序的熵增状态,最终导致灭亡;对于某一生态系统,如果个体的生长不受外部约束(例如天敌、人为调控等),则同样会出现新的无序的熵增状态,从而对整个区域性的生态系统的稳定性造成破坏^[51]。即使是没有生命的智能体,如果处于封闭状态,没有物质、能量和信息的输入,则其很难运行。可见,熵增是个体、组织或系统从有序到无序的物理基础和外部表征,表征着系统功能减弱直到逐渐丧失。

3.2 熵减是时空信息赋能内生动力

对抗熵增,实现熵减,从无序到有序,避免死亡的“唯一办法是从环境中不断地吸取负熵”^[50]。负熵是指能带来熵减的因子,比如物质、能量等。信息是“用来消除不确定性的东西”,因而是一种负熵。著名的“麦克斯韦妖”的假想实验同样说明,信息会导致有序和组织化,即信息是负熵^[24]。通过对系统观测得到的时空信息反过来可以推动系统的整体演化行为^[52],由此可知,时空信息作为一种特殊的信息,同样也属于负熵。熵是现实世界物质存在和运动状态不确定性的表征(图2),通过观测,消除不确定性得到时空信息,该时空信息即为负熵。

对某一特定的系统而言,人们利用时空信息可以消除对复杂系统认知的不确定性,通过有针对性地实施调控作用,触发系统的非线性相互作用和相干效应,有效激活具有耗散结构特征系统的潜在能量^[53-54],通过系统自组织、自调节,使系统从无序状态演进到在时间、空间、结构和功能上的有序状态。如自然生态系统通过物质、能量和时空信息等负熵因子,激活不同生命体之间及生命体与其生存环境之间的非线性涨落的相互作用,实现其自控和自调的自组织,维护系统结构、功能的稳定和自身的演化;其中的每个生命体都是远离平衡状态的开放系统,通过与外界不断地进行物质、能量和时空信息交换,产生负熵流,使系统熵减少,经自组织而形成一系列的有序耗散结构^[55]。例如通过食物链可实现物质、能量和自在形态的时空信息在生态系统中层层传导,推动生态系统的不断进化,达到生态系统的高位平衡。可见熵减导致系统功能增强,是时空信息赋能的内生动力。

3.3 时空信息赋能的作用机理

时空信息作为负熵,可以消除人们对现实世界认识的不确定性,例如描述型的负熵可以消除人们对现实世界时空现象或实体存在状态的不确定性,诊断型负熵可以消除人们对问题是非判断的不确定性,预测型负熵可以消除人们对于时空演化趋势的不确定性,方案型负熵则可以消除人们对时空过程、决策行为的不确定性等。人们接收时空信息的过程,也是负熵直接赋能的过程。人们接受负熵后,通过实施科学合理的生产实践活动或时空行为,作用于外部环境,对现实世界系统的要素、结构、效能等进行调节和优化,促进系统运行从无序到有序,从失调到平衡,进而不确定性降低,信息熵减少,实现间接赋能。因此,时空信息赋能是以时空信息为载体,以负熵流转为动能,以不确定性转化为特征,通过人、机、物(环境)相互影响、相互作用,实现系统结构优化、效能提升的过程(图3)。

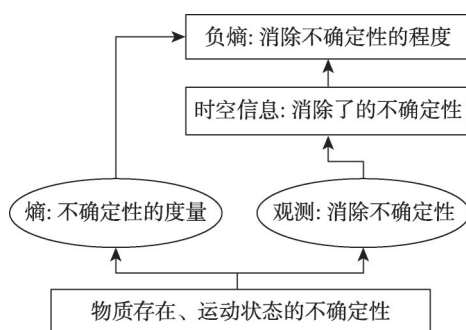


图2 熵、负熵与时空信息

Fig. 2 Entropy, negentropy and spatio-temporal information

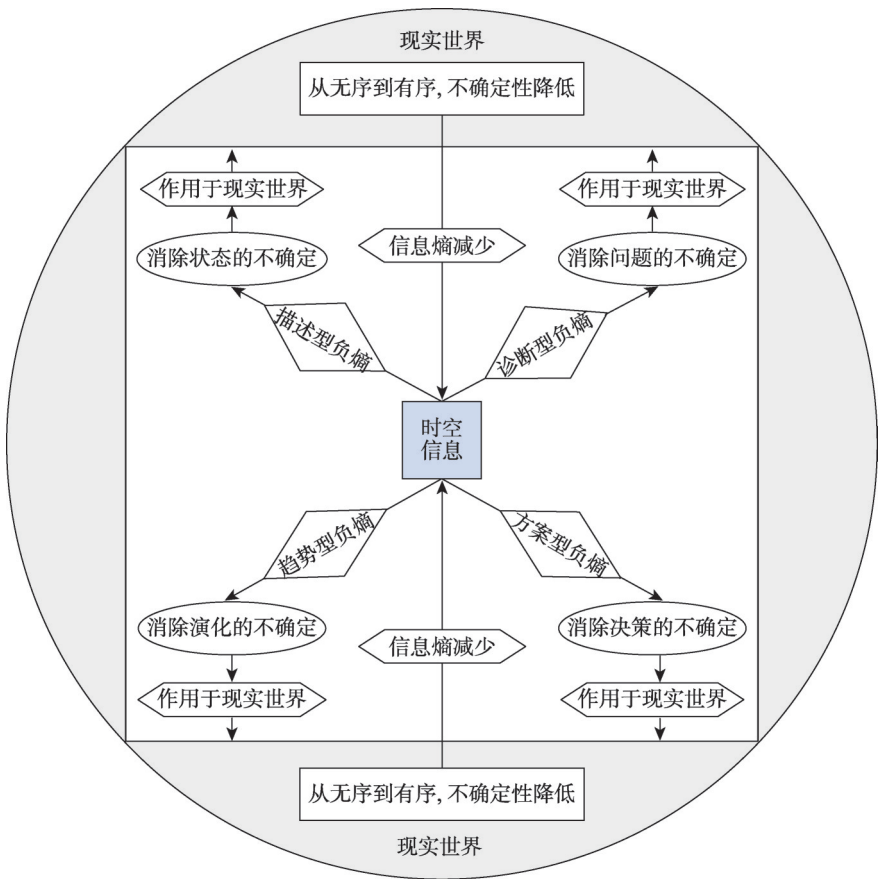


图3 时空信息赋能机理

Fig. 3 Spatio-temporal information empowerment mechanism

时空信息作为负熵，作用于个人、组织、智能体或自然系统等，实现赋能。对个人而言，时空信息蕴含的对现实世界的状态、变化及其关系的确定性信息，其不仅可以精化成为时空知识和时空智能，而且可以转换为人的基础意识能力、情感表达能力、认知谋划能力和决策判断能力^[56]，方便其对特定环境及其事件的了解、认知和应对，提升其判断和处理问题的能力。

对组织管理而言，时空信息可以有效提升组织对特定时空场景的感知、认知和决策能力，将时空信息及其衍生出的时空智能，与数字化治理理论结合，通过变革组织形态、再造组织结构、重塑业务流程，实现组织内部管理行为的“熵减”。对智能体而言，时空信息赋能是通过接收外部输入或智能体动态感知，获取周围环境及其关注实体的时空信息，辅助其对环境中相关实体要素特征及其空间关系的判断、决策和行动的过程。

对自然系统而言，山、水、林、田、湖、草、沙作为自然系统的构成要素，通过物质、能量及时空信息的交换、转化和传输，彼此相互依存、相互影响、相互作用、相互制约，共同组成了一个有机、有序的生命共同体。对于生态良好区域，需要加强生态系统现状的维护和保护，利用时空信息触发行政行为，通过施政者政策引导、法律约束、制度规范，约束或规范人类行为，通过人类行为的“熵减”^[51]，维持自然空间实体正常演化及其能量交换，达到一种和谐、平衡、健康、可持续的“熵减”状态。

对于生态问题突出区域, 坚持问题导向, 按照整体保护、系统修复、综合治理的方针, 分阶段、有序实施综合治理与生态修复。时空信息作为生产要素, 参与自然系统的改造、调节、修复等治理过程, 通过提供时空连接、时空计算和时空智能, 将各要素按照生态系统耦合原理关联, 进行时空事件、时空过程、时空演化分析, 进而实施高效的治理技术和方法, 助推自然系统从无序到有序, 由矛盾到协调、由冲突到联合, 从而达到新的高位平衡状态^[57] (图4)。

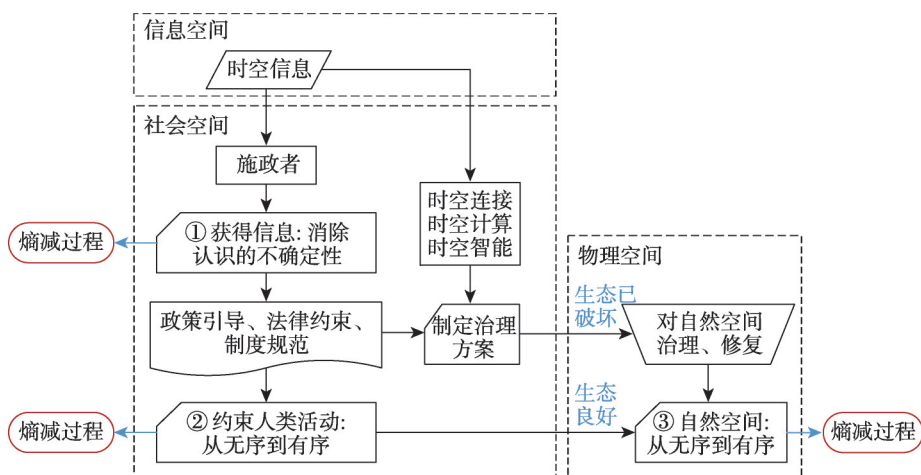


图4 时空信息对自然系统赋能机理

Fig. 4 Mechanism of spatio-temporal information empowerment of natural systems

对社会系统而言, 人类社会的发展同样需要基于人类活动相关的时空信息, 制定相应的时空约束规则, 规范人类的各种行为, 从而实现有组织、有秩序、可持续发展(熵减)。如高质量发展是在资源环境等约束条件下对经济发展的要素条件、组合方式、配置效率进行调节和优化, 求得多重约束下最优解的过程。其是质量和效益全面提升的均衡发展, 是在更高水平上实现供给和需求的动态平衡。因为熵减意味着持续和生存, 有序意味着稳定、均衡和公平, 显然从时间和空间上的无序到有序的熵减, 是高质量发展实现增长的稳定性、发展的均衡性、环境的可持续性、社会的公平性的内在逻辑。因而, 可将时空信息与经济社会发展各领域业务进行有效融合, 为高质量发展提供内在动力, 最终形成用时空信息说话, 在三维空间研判, 凭科学事实决策的数字化治理新模式。

4 时空信息赋能模式

不同存在形态的时空信息, 其赋能的作用机制和外在模式存在一定差异。下面针对时空信息的3种存在形态, 分别讨论其赋能模式。

4.1 作为自在信息直接赋能

信息是人类社会赖以生存、发展的三大基本要素之一^[51, 56-59]。时空信息是一种特殊而又泛在的信息, 是国家基础性、战略性信息资源和生产要素, 与物质、能量一样, 可以作为自在信息直接参与生产实践活动, 作为描述型负熵, 通过消除特定应用场景的时空不确定性来实施赋能。例如, 在军事上, 地图作为生产要素, 可以直接用来消除战场空间的不确定性, 帮助指挥人员全面了解战场环境与作战态势, 精准开展对抗仿真与战术

推演，合理进行排兵布阵和决策指挥，科学评估战斗损失和作战效果，因而被称为战场上空的眼睛，是赢得战争主动权的基础。

将时空信息蕴含的应用场景构成要素、空间结构、时空关系，功能效应等自在信息，输入到智能化的工具或装备，如无人机、智能机器人等，可以引导智能体进行合理的时空规划，有秩序、有计划地参与对现实世界物理空间的改造活动，降低系统存量的不确定性，达到优化空间结构、提升要素质量、改善系统功能的目的^[60]；同时引发其蕴含的自在形态时空信息的变化，通过信息反馈和系统调控，不断进行系统功能和效能的演进优化。再如智能导航通过提供道路路况、车辆位置等时空信息，消除人们对道路选择及其拥堵状况的不确定性，帮助人们合理规划出行线路，提前避开拥堵路段，从而提高出行效率和安全性；对整个交通系统而言，利用导航和交通控制等时空信息，可以调节出行线路，均衡道路负载，避免出现无序拥堵，从而维持交通网络的有序、高效运行。

所以，在人们对现实世界的改造活动中，时空信息作为负熵，可直接作用于自然或社会系统，改变其蕴含时空信息的内容、数量、质量，通过消耗时空信息，降低系统的不确定性，实现其内部的熵减，进而转化为其功能的提升，达到系统高位的平衡状态。

4.2 作为自为信息间接赋能

从时空信息流的角度看，人类认识和实践活动是一个时空信息获取、处理、传递、赋能、反馈、调控等的不断迭代的信息活动，是物理、社会和信息空间耦合赋能的过程（图5）。人类是时空信息的主体，可以从现实世界获取时空信息，转化还原为人们的时空观念或意识，成为高层次的自为信息，来提升时空信息的价值^[56]，进而把这种融入意识加工的时空信息传递给客体，引导客体的实践活动，或主体直接参与完成对现实世界的改造、治理、修复等实践活动，通过时空信息调控作用，有效激发系统各要素在时间、空间上的非线性相互作用和相干效应，促使系统要素空间结构、存在形态、数量质量、分布格局、时空演化、关联约束等从无序到有序的变化，有效提升系统物质、能量

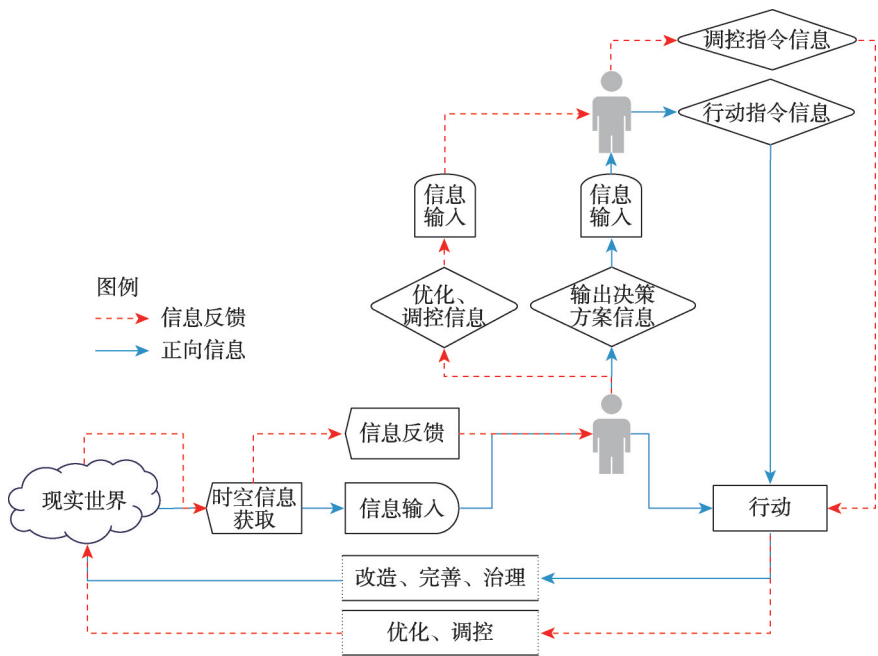


图5 时空信息作为自为信息间接赋能

Fig. 5 Spatio-temporal information as indirect empowerment of self-made information

的利用效率,同时,获取并反馈表征现实世界当前状态的时空信息^[61-62],用于对现实世界的改造、治理、修复的效果进行评估,基于此完善和优化相关的政策、决策、方案,进一步对实践活动进行调控和优化。

例如,煤矿井下采煤后,地表下沉会造成地面房屋、耕地、水系、道路损毁,破坏区域生态系统平衡,逐步从有序状态演化到无序状态。测绘人员基于航空航天影像、三维激光点云、现场调查等时空数据,提取塌陷区场景的耕地、道路、房屋、居民人数、地面附属物、塌陷区范围、塌陷深度等时空信息后,提交给规划设计人员。规划设计人员利用该时空信息,及时掌握塌陷区场景的时空特征,融入其知识和经验,设计出塌陷区复垦施工图,即是加工处理后的自为时空信息,用以指导现场施工人员,通过村庄搬迁,整治复垦、生态修复等,完成对塌陷区的复垦治理工作,使该区域生态系统逐步从无序恢复到新的有序状态。

4.3 转为时空知识倍增赋能

时空知识是一种再生时空信息,是一种高层次负熵。有学者指出在系统中引入有效的先验知识后信息熵总会下降^[63]。时空知识赋能是将时空信息转化为诊断型、预测型、方案型时空知识;再将时空知识转化为管理者处理时空事件的理念、方法和技能,提升人们对时空事件的认知水平、决策智慧和处理能力^[64];辅助人们进行业务流程梳理,主控要素解析、时空变量建模、时空智能计算,实现对现实世界时空格局的科学分析、对时空演变趋势的精准预测及对时空事件态势的综合研判;通过管理者实施的行政行为,如决策、规划或调控等,规范或引导人们科学实施对现实世界物理和社会空间的改造活动,或对现实世界错综复杂的时空事件进行科学有效处理,通过人类行为的“熵减”,维持自然空间或社会空间实体正常演化及其能量交换,达到一种和谐、平衡、健康、可持续发展的“熵减”状态(图6)。

对智能体而言,可将人们在长期社会实践中积累的丰富的时空知识进行解析、处理和形式化表达,与智能体嵌入的机器学习算法融合,在统一的时空框架内,进行数据驱动内归纳、知识引导下推理、行为计算后决策与信息流动中调控等,构建时空信息、时

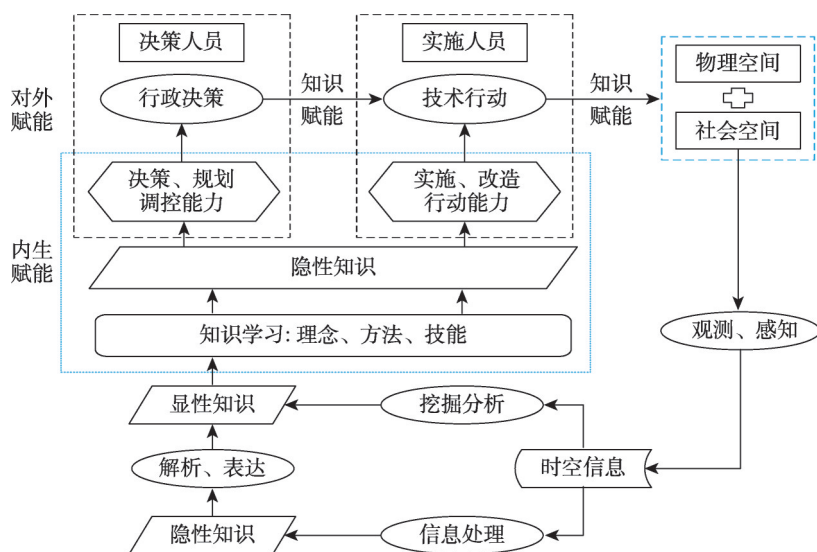


图6 转为时空知识倍增赋能

Fig. 6 Turning to spatio-temporal knowledge multiplication empowerment

空知识、反馈控制于一体的时空智能,作用于智能体,通过对周围环境进行时空感知,主动获取多层次、多角度、多粒度的时空信息,进行不同时间尺度、不同空间尺度下的深度学习,实现自主决策、模式挖掘与行为预测,进一步作用于物理空间,完成对现实世界的改造或行为调节活动。

5 自然资源时空信息赋能路径

自然资源时空信息是国土空间地形地貌、自然资源、人类活动等物质实体的存在形态、空间结构、分布格局、数量质量、空间关联、时空演化等的确定性描述;反映着山、水、林、田、湖、草、沙等时空要素的地理空间分布及变化;贯穿着自然资源“现状调查—变化监测—综合分析—整体决策”全过程,为经济社会发展和自然资源管理提供一张底图、一套底数和一个底板^[9],成为支撑中国数字化发展的重要的战略性信息资源和生产要素。自然资源时空信息赋能是通过时空信息的高质量保障、一体化管理、知识化提升和智慧化应用,促进自然资源业务逻辑与技术逻辑的深度耦合,支撑自然资源协同治理与国土空间科学管控,实现对自然资源“两统一”管理的高效率赋能。

5.1 构建自然资源时空信息基础设施

高质量时空信息是其高效赋能的基础。然而,当前中国尚未形成十分完善的自然资源数量、质量、生态“三位一体”的山、水、林、田、湖、草、沙数据一体化协同获取与治理模式,存在高质量时空数据供给不足、高层次分析能力不强、高水平赋能手段短缺等问题,难以充分满足中国自然资源时空信息高水平赋能的需求^[1, 9]。

从技术层面讲,自然资源时空信息高效赋能涉及到时空信息的实时感知、系统认知、灵性表达和智能服务,需要突破数据治理系统化、资源感知的协同化、场景认知精准化、可视表达动态化、服务形态知识化等关键技术,与物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术融合,构建标准统一、高速泛在、多维动态、智能敏捷、云网融合、空天地海一体的时空信息基础设施^[65],为国土空间数字化发展打造统一、权威、智能的数字化时空底座,打通自然资源各领域业务融合发展的信息“大动脉”,驱动自然资源系统物理空间、社会空间与数字空间的时空耦合,支撑实现数据动态感知、信息深度融合、知识充分共享、业务高效协同、决策智能科学。

5.2 实现自然资源高质量时空信息保障

从时空信息的特性看,数据的不一致性会衍生出新的不确定性。因此,不一致的数据越多,其有效信息量越少,赋能能力就越弱。长期以来,中国的时空信息管理存在“一门多数”“数出多门”问题比较突出,不同部门采用的数据模型、观测手段、观测时点、精度指标不同,导致数据不一致、信息不畅通,共享应用难^[66],直接影响着其应用价值和赋能能力的充分释放^[67-68]。因此,需要打破部门间的信息壁垒,基于山、水、林、田、湖、草、沙生命共同体的系统理念,对各类自然资源相关的实体进行概念、逻辑和物理建模,建立概念清晰、编码统一、语义一致、时空关联的时空信息模型,构建以数据汇聚—融合—共享—服务为主线的时空数据治理技术体系,对多时态、多维度、多尺度、多要素时空大数据进行有效治理,实现自然资源时空信息在时间、空间、语义、管理、服务等方面的一体化表达,为自然资源数字化管理提供高质量时空信息保障。

此外,需要建立和维护健康有序、持续运行的自然资源时空数据生态。其是由时空数据生产者、使用者、管理者及外部相关安全环境、技术环境、经济环境、发展环境

等^[38],共同构成的互为补充、互相关联、互相制约、分建共享、持续更新的数据治理模式;以打破行业间、部门间“数据孤岛”,实现跨层级、跨地域、跨系统、跨组织、跨业务的时空数据互联互通;进一步建立时空数据产权、赋权、交易、评价的相关机制,充分释放时空信息作为生产要素的潜能,推动自然资源时空数据从“技术治理”逐步走向“资产治理”^[60]。

5.3 开展自然资源高品质时空知识服务

将时空信息转为时空知识可以实现倍增赋能。这就需要着手谋划和突破自然资源时空知识工程的关键技术,研制时空信息智能计算、分析、推理和服务引擎,提供多元实体的时空关联、时空知识的深度挖掘、时空关系的演绎推理和时空事件的分析研判功能,形成基于自然资源时空数据的态势感知能力、场景认知能力、形势预判能力和宏观决策能力。

在此基础上,利用时空信息基础设施,动态获取物联感知数据,适时汇聚领域专题信息,广泛开展时空信息共享,按需实施时空知识工程,将现有社会经济数据与多时态、多尺度、多类型的自然资源时空数据进行时空连接,开展关联挖掘、格局发现、功能辨识与趋势预测,形成对国土空间要素分布格局、相互作用、相互关系及其时空演化等的系统性认识,并进行空间化、系统化、关联化、结构化建模和表达,建立自然资源时空知识图谱,支撑自然资源领域开展“描述性、诊断型、预测型、方案型”时空知识服务。

5.4 实现自然资源高水平时空耦合赋能

从管理视角看,自然资源时空信息赋能是一项跨领域、跨区域、跨学科的系统性工程^[69-70],需要从整体性与系统性出发,依据“两统一”管理的行政业务逻辑,统筹谋划和全面推进时空信息在自然资源管理和国土空间治理中的智慧化应用。首先,基于时空信息基础设施,建立以自然资源“全面动态感知、系统精准认知、全域智慧管控”为目标的技术逻辑^[1],提供高质量时空信息和高品质时空知识;进而,以时空信息流承载自然资源跨域业务流,以跨域业务流引导时空知识发现,将时空知识与跨域业务深度耦合,实现时空信息和时空知识的叠加倍增赋能,有效促进自然资源部门技术逻辑和业务逻辑的耦合融通,推动自然资源跨领域业务大融合,以便于重构自然资源业务新模式,实现自然资源高质量发展,从而高效率赋能经济社会的高质量发展。

6 结语

时空信息是数字中国和数字经济建设的时空基底。时空信息高效赋能是经济社会各领域高质量发展的时代需求。本文梳理提出了时空信息的基本概念、丰富内涵和基本特征,在此基础上,分析提出了时空信息赋能的内部机理,并结合自然资源时空信息赋能,探讨了时空信息赋能的路径。总体而言,利用不同形态的时空信息,有效激活具有耗散结构特征的系统潜在能量,驱动系统物理空间、社会空间与数字空间的时空耦合,通过自组织、自调节,实现系统要素的耦合联动与协同共生,使系统从无序状态演进到在时间、空间和功能上的有序状态,是时空信息赋能的基本模式。

从技术上分析,实现时空信息赋能,需要构建时空数据生态,突破时空数据动态感知、时空信息精准认知、时空知识系统凝练、时空智能高效服务的关键技术,实现从时空数据、时空信息到时空知识的不断精化和品质提升。

参考文献(References)

- [1] Chen Jun, Wu Hao, Zhang Jixian, et al. Building natural resources surveying and monitoring technological system: Direction and research agenda. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1041-1055. [陈军, 武昊, 张继贤, 等. 自然资源调查监测技术体系构建的方向与任务. *地理学报*, 2022, 77(5): 1041-1055.]
- [2] Zheng Lei. The validity, temperature and scale of digital governance. *Governance Studies*, 2021, 37(2): 5-16, 2. [郑磊. 数字治理的效度、温度和尺度. *治理研究*, 2021, 37(2): 5-16, 2.]
- [3] Li Zhen. Empowerment of digital economy to the new development paradigm: Theoretical foundation, challenges, and response. *Journal of Social Sciences*, 2022(3): 43-53. [李震. 数字经济赋能新发展格局: 理论基础、挑战和应对. *社会科学*, 2022(3): 43-53.]
- [4] Meng Tianguang. Elements, mechanisms and approaches towards digital transformation of government: The dual drivers from technical empowerment to the state and society. *Governance Studies*, 2021, 37(1): 5-14, 2. [孟天广. 政府数字化转型的要素、机制与路径: 兼论“技术赋能”与“技术赋权”的双向驱动. *治理研究*, 2021, 37(1): 5-14, 2.]
- [5] Xu Mengzhou, Lv Tie. Empowering digital economy development by developing digital government: Inherent logic and innovative path. *Study & Exploration*, 2020(3): 78-85, 175. [徐梦周, 吕铁. 赋能数字经济发展的数字政府建设: 内在逻辑与创新路径. *学习与探索*, 2020(3): 78-85, 175.]
- [6] Shen Feiwei, Zhu Jingwen. Data empowerment: Operation mechanism and innovation path of digital government governance in the era of intelligence. *CASS Journal of Political Science*, 2021(1): 104-115, 158. [沈费伟, 诸靖文. 数据赋能: 数字政府治理的运作机理与创新路径. *政治学研究*, 2021(1): 104-115, 158.]
- [7] Ren Baoping, He Houcong. Empowerment of digital economy to high-quality development: Theoretical logic, path choices and policy orientation. *Finance & Economics*, 2022(4): 61-75. [任保平, 何厚聪. 数字经济赋能高质量发展: 理论逻辑、路径选择与政策取向. *财经科学*, 2022(4): 61-75.]
- [8] Huang Huang. Conceptual structure of digital government: Information competence, data flow and knowledge application based on the combination of DIKW model and IDK principle. *Academia Bimestris*, 2018(4): 158-167. [黄璜. 数字政府的概念结构: 信息能力、数据流动与知识应用: 兼论 DIKW 模型与 IDK 原则. *学海*, 2018(4): 158-167.]
- [9] Chen Jun, Wu Hao, Liu Wanzeng, et al. Technical connotation and research agenda of natural resources spatio-temporal information. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1130-1140. [陈军, 武昊, 刘万增, 等. 自然资源时空信息的技术内涵与研究方向. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1130-1140.]
- [10] Liu Ning, Peng Feifan, Yu Mengxin. Literature review and future prospects of digital empowerment. *Research on Development*, 2021(6): 58-65. [刘宁, 彭飞凡, 于梦鑫. 数字化赋能研究述评及未来展望. *开发研究*, 2021(6): 58-65.]
- [11] Liu Pingfeng, Wang Yuting, Su Chaochao. Research on the mechanism and path of big data empowering enterprise knowledge management innovation: Based on the case of Huawei's practice. *Science & Technology Progress and Policy*, 2021, 38(1): 122-131. [刘平峰, 王雨婷, 苏超超. 大数据赋能企业知识管理创新机理与路径研究: 基于华为为案例. *科技进步与对策*, 2021, 38(1): 122-131.]
- [12] Zhang Yunping, Luan Jing. Digital economy enables rural revitalization: Theoretical mechanism, restrictive factors and implementation path. *Reform*, 2022(5): 79-89. [张蕴萍, 栾菁. 数字经济赋能乡村振兴: 理论机制、制约因素与推进路径. *改革*, 2022(5): 79-89.]
- [13] Fan Ruguo. Platform technology enabling, public gaming and complex adaptive governance. *Social Sciences in China*, 2021(12): 131-152, 202. [范如国. 平台技术赋能、公共博弈与复杂适应性治理. *中国社会科学*, 2021(12): 131-152, 202.]
- [14] Zhou Wei. Data empowerment: The theoretical logic and optimization path of digital business environment construction. *Truth Seeking*, 2022(4): 30-42, 110. [周伟. 数据赋能: 数字营商环境建设的理论逻辑与优化路径. *求实*, 2022(4): 30-42, 110.]
- [15] Sun Xinbo, Su Zhonghai, Qian Yu, et al. Research review and prospects of data empowerment. *R&D Management*, 2020, 32(2): 155-166. [孙新波, 苏钟海, 钱雨, 等. 数据赋能研究现状及未来展望. *研究与发展管理*, 2020, 32(2): 155-166.]
- [16] Luo Qianfeng, Zhao Qifeng, Zhang Lixiang. Realization path of digital technology enabling high-quality agricultural development. *Contemporary Economic Management*, 2022, 44(7): 49-56. [罗千峰, 赵奇峰, 张利庠. 数字技术赋能农业高质量发展的理论框架、增效机制与实现路径. *当代经济管理*, 2022, 44(7): 49-56.]
- [17] Xia Jiechang, Wang Pengfei. Empowerment of digital economy to high-quality development of public service: Function mechanism and key direction. *Jiangxi Social Sciences*, 2021, 41(10): 38-47, 254, 2. [夏杰长, 王鹏飞. 数字经济赋能公共服务高质量发展的作用机制与重点方向. *江西社会科学*, 2021, 41(10): 38-47, 254, 2.]

- [18] Zhu Xiaoyan. Digital economy empowers manufacturing transformation: Theoretical logic, practical problems and path choice. *Enterprise Economy*, 2022, 41(5): 50-58. [朱小艳. 数字经济赋能制造业转型: 理论逻辑、现实问题与路径选择. *企业经济*, 2022, 41(5): 50-58.]
- [19] Zhang Zhengang, Yang Yuling, Chen Yihua. Digital servitization of manufacturing firms: The value creation driven by digital enablement. *Science of Science and Management of S & T*, 2022, 43(1): 38-56. [张振刚, 杨玉玲, 陈一华. 制造企业数字服务化: 数字赋能价值创造的内在机理研究. *科学学与科学技术管理*, 2022, 43(1): 38-56.]
- [20] Chen Jun, Wang Yanhui, Wu Hao, et al. Basic issues and development directions of high-quality development empowered by spatio-temporal information. *Journal of Spatio-temporal Information*, 2023, 30(1): 1-11. [陈军, 王艳慧, 武昊, 等. 时空信息赋能高质量发展的基本问题与发展方向. *时空信息学报*, 2023, 30(1): 1-11.]
- [21] Pan Yunhe. Artificial intelligence 2.0 and educational development. *Chinese Journal of Distance Education*, 2018(5): 5-8, 44, 79. [潘云鹤. 人工智能 2.0 与教育的发展. *中国远程教育*, 2018(5): 5-8, 44, 79.]
- [22] Tian Jing, Wang Jinlin. Next generation of information technology for sensing China: Cooperation of cloud and sea. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2015, 45(10): 1229-1236. [田静, 王劲林. 面向感知中国的新一代信息技术: 海云协同, 走向未来. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(10): 1229-1236.]
- [23] Guo Renzhong, Lin Haojia, He Biao, et al. GIS framework for smart cities. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1829-1835. [郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 等. 面向智慧城市的 GIS 框架. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(12): 1829-1835.]
- [24] Sun Zhenyu. Classical spacetime theories: Historical evolutions and rational reconstructions. *Studies in Dialectics of Nature*, 2021, 37(1): 65-71. [孙振宇. 经典时空理论的科史源流及理性重构. *自然辩证法研究*, 2021, 37(1): 65-71.]
- [25] Ruan Xiaogang. General observational relativity: Why is spacetime curved in Einstein's General Relativity? (Part I): The establishment of GOR theory. *Journal of Beijing University of Technology*, 2023, 49(2): 103-178. [阮晓钢. 广义观测相对论: 时空在爱因斯坦广义相对论中为什么弯曲? (上篇): GOR 理论的建立. *北京工业大学学报*, 2023, 49(2): 103-178.]
- [26] Sun Wenbo. Philosophical analysis of Marxist space-time concept. *Yangtze River Series*, 2021(2): 191-194. [孙闻博. 马克思主义时空观的哲学分析. *长江丛刊*, 2021(2): 191-194.]
- [27] Zheng Siyu. The construction of ecological civilization from the perspective of Marxist space-time concept. *Journal of Dalian Official*, 2021, 37(2): 39-43. [郑思瑜. 马克思主义时空观视阈下的生态文明建设研究. *大连干部学刊*, 2021, 37(2): 39-43.]
- [28] Li Qiang, Wang Huan. On Marx's dialectics in spatial geography. *Studies in Dialectics of Nature*, 2022, 38(2): 116-122. [李强, 王欢. 马克思空间地理学中的辩证法思想. *自然辩证法研究*, 2022, 38(2): 116-122.]
- [29] Ma Yuxing. Space-time is the meta-definition of existence. *Journal of Nanchang Normal University*, 2019, 40(3): 93-96. [马豫星. 时空存在的第一规定性. *南昌师范学院学报*, 2019, 40(3): 93-96.]
- [30] Zhang Yang, Jia Yanfei. Spatialization of time: Research path of spatial-temporal relations in historical cities: A comparative perspective based on Chinese and Western philosophies. *Urban Development Studies*, 2020, 27(7): 75-82. [张杨, 贾艳飞. 时间的空间化: 历史城市时空关系的研究路径: 基于中西方哲学的比较视角. *城市发展研究*, 2020, 27(7): 75-82.]
- [31] Bu Weiwei, Cheng Yun. The definitions of "information" and its philosophical nature. *Thinking*, 2005(4): 129-131. [卜炜炜, 成韵. 信息的定义及哲学本质. *思想战线*, 2005(4): 129-131.]
- [32] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [33] Wu Kun, Xia Qunyou. Re-argument on the in-itself information. *Studies in Philosophy of Science and Technology*, 2012, 29(2): 8-12. [邬焜, 夏群友. 再论自在信息. *科学技术哲学研究*, 2012, 29(2): 8-12.]
- [34] Wu Kun. The discussion of some major issues related to information ontology. *Philosophical Analysis*, 2015, 6(2): 42-54, 197. [邬焜. 与信息本体论相关的若干重大问题的讨论. *哲学分析*, 2015, 6(2): 42-54, 197.]
- [35] Pan Yutian. From the perspective of reception process: In-itself, being-itself, and regeneration of literature information. *Documentation, Information & Knowledge*, 1990(2): 19-20. [潘玉田. 从接受过程看文献信息的自在、自为与再生. *图书情报知识*, 1990(2): 19-20.]
- [36] Wu Kun. To expound to complexity of space-time. *Journal of Renmin University of China*, 2005(5): 36-43. [邬焜. 论时空的复杂性. *中国人民大学学报*, 2005(5): 36-43.]
- [37] Zhang Jizhe. On the information content, form, and carrier. *Archives Science Bulletin*, 2008(1): 23-25. [张辑哲. 论信息的内容、形式与载体. *档案学通讯*, 2008(1): 23-25.]
- [38] Liu Wanzeng, Chen Jun, Zhai Xi, et al. Research progress and application of spatiotemporal knowledge center. *Acta*

- Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(9): 1183-1193. [刘万增, 陈军, 翟曦, 等. 时空知识中心的研究进展与应用. 测绘学报, 2021, 50(9): 1183-1193.]
- [39] Zhang Jizhe. On the information formation and quality (Part II): The quality, quantity, and meaning of information. Archives Science Bulletin, 2006(3): 20-22. [张辑哲. 论信息形态与信息质量(下): 论信息的质与量及其意义. 档案学通讯, 2006(3): 20-22.]
- [40] Ci Song, Liu Qianwei, Kang Chongqing, et al. Fundamental exploration into ICT-energy fusion. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2289-2297. [慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息—能量”基本关系看信息能源深度融合. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2289-2297.]
- [41] Chen Guanyu, Da Duoshuang, Li Wenjie, et al. Research on key technology of integrated production of surveying and mapping. Geospatial Information, 2023, 21(2): 82-84. [陈冠宇, 达多双, 李文杰, 等. 测绘一体化生产的关键技术研究. 地理空间信息, 2023, 21(2): 82-84.]
- [42] Wang Dan, Geng Dan, Li Dantong. On the construction of new fundamental surveying and mapping system. Beijing Surveying and Mapping, 2021, 35(7): 833-838. [王丹, 耿丹, 李丹彤. 论新型基础测绘体系建设. 北京测绘, 2021, 35(7): 833-838.]
- [43] Liu B J, Deng M, Liu H M, et al. A multilevel visual feature-based approach for measuring the spatial information in remote sensing images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(10): 4110-4122.
- [44] Li Z L, Huang P Z. Quantitative measures for spatial information of maps. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(7): 699-709.
- [45] Gao Peichao, Cheng Changxiu, Ye Sijing, et al. The review and applications of spatial Boltzmann entropy. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1579-1590. [高培超, 程昌秀, 叶思菁, 等. 空间玻尔兹曼熵的研究进展与应用. 地理学报, 2021, 76(7): 1579-1590.]
- [46] Sawant S S, Manoharan P. Unsupervised band selection based on weighted information entropy and 3D discrete cosine transform for hyperspectral image classification. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(10): 3948-3969.
- [47] Li Yi. Information and information quality. Studies in Dialectics of Nature, 1998(12): 36-38. [李艺. 信息与信息量. 自然辩证法研究, 1998(12): 36-38.]
- [48] Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 387-398. [陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.]
- [49] Xu Xiaojing. Principle of entropy increase and entropy decrease in the perspective of organization inertia. Leadership Science, 2022(12): 67-70. [徐晓婧. 组织惰性视角下组织熵增定律与熵减策略. 领导科学, 2022(12): 67-70.]
- [50] Xu Jin. Principle of entropy increase and open competition. China Power Enterprise Management, 2022(16): 92-93. [徐进. 熵增定律与开放竞争. 中国电力企业管理, 2022(16): 92-93.]
- [51] Wang Yuming. The analysis of entropy changes on the evolutionary tendency of geographical environment. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(11): 1508-1517. [王玉明. 地理环境演化趋势的熵变化分析. 地理学报, 2011, 66(11): 1508-1517.]
- [52] Song Changqing, Cheng Changxiu, Yang Xiaofan, et al. Understanding geographic coupling and achieving geographic integration. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 3-13. [宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 等. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. 地理学报, 2020, 75(1): 3-13.]
- [53] Zhan Kenhua, Shen Xiaofeng. Prigogine and Theory of Dissipative Structure. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1998. [湛垦华, 沈小峰. 普利高津与耗散结构理论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.]
- [54] Kondepudi D K, De Bari B, Dixon J A. Dissipative structures, organisms and evolution. Entropy, 2020, 22(11): 1305.
- [55] Lin Zhenming, Xia Bin. Analysis of sustainable development ability of the urban ecosystem in Guangzhou city in the perspective of entropy. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 45-57. [林珍铭, 夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析. 地理学报, 2013, 68(1): 45-57.]
- [56] Wu Kun, Luo Li. On the holographic unity of information, knowledge, intelligence and practice. Journal of Intelligence, 2018, 37(5): 21-25, 51. [邬焜, 罗丽. 试论信息、知识、智能、实践的全息统一性. 情报杂志, 2018, 37(5): 21-25, 51.]
- [57] Liao Zhijie, Liu Yue. Comprehensive indexes and spatial distribution characteristics of the regional sustainable development of China. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 139-150. [廖志杰, 刘岳. 中国区域可持续发展水平及其空间分布特征. 地理学报, 2000, 55(2): 139-150.]
- [58] He Yanzhou, Wang Cheng. The evolution and sustainable development capacity of rural production space system based

- on information entropy. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 815-828. [何焱洲, 王成. 基于信息熵的乡村生产空间系统演化及其可持续发展能力. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 815-828.]
- [59] Wen Xiaogang. Second quantum revolution in physics. *Physics*, 2015, 44(4): 261-266. [文小刚. 物理学的第二次量子革命. *物理*, 2015, 44(4): 261-266.]
- [60] Chen Yang, Gao Kefu. Liu Jingnan: "Beidou + 5G" empowering the ubiquitous network with spatio-temporal intelligence. *China Surveying and Mapping*, 2022(12): 12-16. [陈阳, 高柯夫. 刘经南: “北斗+5G”为泛在网络赋予时空智能. *中国测绘*, 2022(12): 12-16.]
- [61] Umpleby S A. Physical relationships among matter, energy and information. *Systems Research and Behavioral Science*, 2007, 24(3): 369-372.
- [62] Toyabe S, Sagawa T, Ueda M, et al. Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Physics*, 2010, 6(12): 988-992.
- [63] Zhou Xiang, Ye Wenping, Li Xinchun. Digit- intellectualized knowledge orchestration and the evolution of organizational dynamic capabilities: A case study of Xiaomi technology. *Journal of Management World*, 2023, 39(1): 138-157. [周翔, 叶文平, 李新春. 数智化知识编排与组织动态能力演化: 基于小米科技的案例研究. *管理世界*, 2023, 39(1): 138-157.]
- [64] Zhao Shiyang, Hong Xiaonan. The dialectical relationship between explicit knowledge and tacit knowledge. *Studies in Dialectics of Nature*, 2001(10): 20-23, 33. [赵士英, 洪晓楠. 显性知识与隐性知识的辩证关系. *自然辩证法研究*, 2001(10): 20-23, 33.]
- [65] Shi Rui, Wang Taosheng. Spatio-temporal intelligence (the key basic capacity in the digital era): Spatio-temporal intelligence, artificial intelligence, online new economy, and new infrastructure construction. *Satellite Application*, 2022 (2): 63-65. [史睿, 汪陶胜. 时空智能: 数字时代关键基础能力: 时空智能与人工智能、在线新经济和“新基建”. *卫星应用*, 2022(2): 63-65.]
- [66] Xue Chao, Jia Zongren. Top-level design and enlightenment of federal government spatial-temporal data governance in natural resource community in the United States. *China Mining Magazine*, 2022, 31(Suppl.1): 26-29, 56. [薛超, 贾宗仁. 美国联邦政府自然资源时空数据治理的顶层设计与启示. *中国矿业*, 2022, 31(Suppl.1): 26-29, 56.]
- [67] Yang Zhenkai, Zhang Jiangshui, Li Xiang, et al. The basic issues of composition structure of spatio-temporal objects. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2021, 38(6): 639-645. [杨振凯, 张江水, 李翔, 等. 时空对象组成结构基本问题初探. *测绘科学技术学报*, 2021, 38(6): 639-645.]
- [68] Xue Cunjin, Su Fenzhen, He Yawen. Process: A new view of geographical spatiotemporal dynamic analysis. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(1): 65-79. [薛存金, 苏奋振, 何亚文. 过程: 一种地理时空动态分析的新视角. *地球科学进展*, 2022, 37(1): 65-79.]
- [69] Lu Shengqiang. Research and application of spatio-temporal data lake. *Natural Resources Informatization*, 2021(3): 28-33, 53. [陆生强. 时空数据湖的研究与应用. *自然资源信息化*, 2021(3): 28-33, 53.]
- [70] Zhen Feng, Zhang Shanqi, Qin Xiao, et al. From informational empowerment to comprehensive empowerment: Exploring the ideas of smart territorial spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2060-2072. [甄峰, 张姗琪, 秦萧, 等. 从信息化赋能到综合赋能: 智慧国土空间规划思路探索. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2060-2072.]

The basic connotation and empowerment mechanism of spatio-temporal information

LIU Wanzeng^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}

(1. National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China; 2. Key Laboratory of Spatio-temporal Information and Intelligent Services, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100830, China)

Abstract: The empowerment of spatio-temporal information fully releases and amplifies its value as a critical factor of production, meeting the need of the era to support the high-quality development across diverse economic and social sections. Currently, foundational research into the empowerment of spatio-temporal information remains undeveloped, predominantly constrained by the perception that empowerment is synonymous with application. The lack of comprehensive understanding and investigation into its mechanism results in ambiguity in both the connotation and extension of spatio-temporal information, as well as the intrinsic mechanism of its empowerment. Such vagueness restricts the empowerment in a scientific and efficient manner. There is an immediate necessity to delineate its fundamental essence, mechanisms of empowerment, and operational modes clearly. To address the aforementioned challenges, this paper defines the foundational concept, explores the rich connotation, and outlines the essential characteristics of spatio-temporal information. It posits that entropy serves as the physical foundation for the empowerment of spatio-temporal information, with entropy decrease acting as its inherent driving force. The empowerment of spatio-temporal information utilizes spatio-temporal information as the medium, driven by the negative entropy flow, marked by the transformation of inherent uncertainty. This process enhances both the system's structure and performance through the dynamic interplay among humans, machines and the external environment. This paper describes three empowerment modes of spatio-temporal information: taking spatio-temporal information as the in-itself information for direct empowerment, employing it as the being-itself information for indirect empowerment, and converting it into spatio-temporal knowledge for enhanced empowerment. Lastly, this paper investigates the pathways through which the empowerment of spatio-temporal information contributes to the high-quality development of natural resources.

Keywords: spatio-temporal information; high-quality development; empowerment; mechanism; information entropy; territorial space