

引用格式:朱阿兴,闫国年,周成虎,等.地理相似性:地理学的第三定律?[J].地球信息科学学报,2020,22(4):673-679. [ Zhu A X, Lv G N, Zhou C H, et al. Geographic similarity: Third Law of Geography?[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):673-679. ] DOI:10.12082/dqxkx.2020.200069

## 地理相似性:地理学的第三定律?

朱阿兴<sup>1,2,3,4</sup>, 闫国年<sup>1,2</sup>, 周成虎<sup>3</sup>, 秦承志<sup>3</sup>

1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
4. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA

### Geographic Similarity: Third Law of Geography?

ZHU Axing<sup>1,2,3,4\*</sup>, LV Guonian<sup>1,2</sup>, ZHOU Chenghu<sup>3</sup>, QIN Chengzhi<sup>3</sup>

1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA

**Abstract:** Laws, in expressing the relationships that existed in the world, are powerful ways for people to understand and communicate human understandings. In this paper through the comparison of laws in geography and those well accepted laws in physics (namely Newton's Laws), we concluded that the laws in geography also fit the definition of "law" albeit the laws in geography are different from the laws in physics in how they are generated and how they are expressed. We further compared the geographic similarity principle or the Third Law of Geography as suggested by Zhu et al (Annals of GIS, 2018,24(4):225-240) with the existing laws of geography from the perspectives of broadness, independence and applicability and found that the geographic similarity principle has the similar broad implications in geography as the other two laws but it is fundamentally different from the other two. It solves problems in geographic analysis that the other two were found to be insufficient. We thus believe that geographic similarity principle would serve a great candidate of the Third Law of Geography.

**Key words:** law; First Law of Geography; Second Law of Geography; Third Law of Geography; geographic similarity

\*Corresponding author: ZHU Axing, E-mail: azhu@wisc.edu

**摘要:** 定律对知识的理解和传播具有极大的推动作用。本文通过对比地理学中的定律和物理学中的定律的异同之处,认为地理学的定律虽然在形式上和提出的方式上与经典的力学定律有所区别,但仍符合人们对“定律”的定义。在共识地理学定律

收稿日期:2020-02-11;修回日期:2020-03-16.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41431177、41871300、41421001、41930648);中国科学院“百人计划”项目;国家“千人计划”项目;国家“863”计划项目(2011AA120305);国家“973”计划项目(2015CB954102);美国威斯康星大学项目“Vilas Associate Award”、“Hamel Faculty Fellow Award”、“Manasse Chair Professorship”。 [ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41431177, 41871300, 41421001, 41930648; Support from Chinese Academy of Sciences; Support from Nanjing Normal University; National "863" Program, No.2011AA120305; National "973" Program, No.2015CB954102; University of Wisconsin Program Funding: Vilas Associate Award, Hamel Faculty Fellow Award, Manasse Chair Professorship. ]

**作者简介:** 朱阿兴(1962—),男,浙江长兴人,教授,主要从事空间推测、流域系统综合模拟与情景分析、地学易计算等研究。  
E-mail: azhu@wisc.edu

存在的前提下,本文阐述了地理学的第一定律和第二定律中所体现出的地理学定律的特征——描述性和归纳性。基于这些对地理学定律所具有的特征的认识,本文首先介绍了Zhu等从空间推测的角度将所提出的地理学第三定律,即“地理环境越相似,地理特征越相近”,或称地理相似性定律。本文从普遍性、独立性和应用性3个方面探讨了地理相似性是否可以作为地理学的一个定律,认为地理相似性与地理学第一和第二定律相比,有着同样的普遍性,且与第一和第二定律所涉及的规律有着本质上的区别,在应用上可能解决第一和第二定律所面临的挑战,因此应可作为地理学第三定律。

**关键词:**定律;地理学第一定律;地理学第二定律;地理学第三定律;地理相似性

## 1 什么是定律?

《汉语大辞典》对“定律”一词的解译是:“客观规律的概括,它体现事物之间在一定环境中的必然的关系”。Merriam-Webster字典记之甚详:“a statement of an order or relation of phenomena that so far as is known is invariable under the given conditions”,“a general statement proved or assumed to be hold between mathematical or logical expressions”。概其定义,发现“定律”不外乎2点:①它是一种规律,是一种“必然关系”,是“a general statement”,必须有一定的广泛性;②它是有条件的,只能在“一定环境中”存在,它的适用性需要“given conditions”,而且只局限于现有的认知条件下(即“so far as is known”)。因此,“定律”是经过总结和提炼被概括出来的某种规律,它并非放之四海而皆准的,也不是行之百世而不悖。

实际上能被人们广泛接受的定律大多也是如此。例如,人们所熟知的牛顿第一和第二运动定律,它们阐述了力与运动之间的必然关系(规律),它们也是有前提条件,即只适用于惯性参照系中的低速运动的宏观质点。也就是说,牛顿的运动定律在具有加速度或旋转的参照系里是不适用的,且适用对象(物体)必须是点物体,而对具有形状和体积的物体,以及能变形的物体(如液体等)并不适用。另外,这些点状物必须是宏观的质点,微观粒子(即作用量接近或小于普朗克常量的粒子,如量子)以及运动速度与光速接近的高速运动物体都不符合牛顿运动定律的应用条件。

尽管有这些限制和约束条件,但牛顿的定律无论从完善知识体系的理论角度还是从促进社会发展的实际应用角度都意义重大。牛顿的这些定律让我们首次比较准确地理解了力与物体运动的定量关系,为人们理解和解释许多自然现象(如日、月、星辰的运行规律)的物理机制提供了不可缺的理论基础和定量手段,极大提升了人类对自然现象的掌控能力。在日常生活和生产实际中,牛顿运动

定律引导了安全且高效的机械结构或产品的研发,广泛应用于飞机和车辆等运动机械的设计和制造中。牛顿运动定律在信息社会学、金融等领域也有突出的应用<sup>[1-2]</sup>。

除了上述实际应用以外,牛顿以定律的方式所提出的这些规律(必然关系)作为巨人的肩膀,也为人们研究力与运动之间的关系提供了一个关键的起点,极大地推动了力与运动关系及其相关领域研究的发展。①牛顿的定律提出后,莱昂哈德·欧拉针对该定律不适用于具有形态和能变形的物体这一缺陷所提出的应用于多粒子系统运动或刚体运动的欧拉(Euler)定律,而且这一定律对流体力学的发展取起到了极大的推动作用;②人们根据牛顿定律对高速运行物体的不适用性,成功地为狭义相对论的提出找到了研究的切入点<sup>[3]</sup>;③牛顿定律对微观粒子的不适用性则为量子力学的发展铺下了道路<sup>[4]</sup>。

定律对知识的理解和传播具有极大的推动作用。首先,定律用最简易和直接(甚至是绝对)的方式陈述一种必然关系,尽管这样的陈述方式可能会因过于精炼而造成简化,从而引起批判,但它往往可以让人们从比较复杂的知识体系中抓到知识的核心和本质,这让初学者、其他领域里的学者乃至大众理解或掌握这一知识变得特别容易,此中意义非凡。其次,因为这样绝对的方式容易使人们用批判性的视角看待这些知识,而“批判”会让人们更充分的解读定律,对它不断地肯定和质疑,从而加深对这一知识甚至整个知识体系的理解,进而推动这个知识领域的发展。可以想象一下,如果没有牛顿定律,物理学是否还会是现在这样的存在。

## 2 地理学的定律

Waldo Tobler 发表于1970年的《A computer movie simulating urban growth in the Detroit region》文章中的那句“I invoke the first law of geography: everything is related to everything else, but near

things are more related than distant things”<sup>[5]</sup>标志着地理学第一定律的诞生。但此后的20多年中,由于地理现象的复杂性,同时地理学者在研究中对“独特性”或“具体性”的注重,对地理学定律的宏观探索显得停滞不前。随着地理信息系统(GIS)的出现,地理信息科学的学者们为了寻找能支撑地理信息系统设计和应用的基本理论和规则,在整理地理学计量革命时期(20世纪50年代—70年代)研究成果的过程中,Tobler的地理学第一定律得到了重视<sup>[6]</sup>,并在地理信息系统的教科书中加以阐述,为地理信息系统中的空间分析方法提供理论依据<sup>[7]</sup>。在2003年美国地理学会年会上,Sui<sup>[8]</sup>组织了题为“On Tobler's First Law of Geography”的专题讨论,这个专题会以及其后在美国地理学报上发表的系列专题论文又重新激活了地理学学者对地理学定律的讨论,也引发了其他学者对地理学其他定律的探索<sup>[6,9]</sup>。

地理学第一定律(“Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things”)概括性地陈述了地理现象在空间上的相关性(相近的事物更相关),即空间自相关性。它所描述的地理现象的这一规律是普遍存在的,也是广为人知的,是我们赖以生存的基本条件。否则我们无法想象人类将如何在这个地理空间中生活,因为我们无从得知与我们所在的这个点相连接的地方是什么?它们的高程是什么?它们的温度又是什么?若如此,我们就会变得寸步难行,以至于无法生存。

地理学第一定律虽以定性的方式描述了地理现象在空间上的自相关性,但为地理信息的表达、分析以及应用提供了不可替代的量化计算的理论依据,也为地理信息系统中分析算法的设计提供了坚实的理论基础<sup>[10-16]</sup>。一个通俗的例子是气象信息的获取、表达和应用,我们对气象站的布置不是隔几米或几十米布设一个,而是在相当广阔的地域中,“零星”地布置了几个站点。其原因很简单,关键气象要素在空间上具有广泛的自相关性,利用这些“零星”站点的气象信息及气象要素的空间自相关性,我们可以比较准确地推测无气象站地区的气象条件,这也是我们每天早上起来后可以根据手机上最邻近气象站点的信息来决定我们出门该穿多少衣服、是否要带雨伞的原因。

地理学第二定律(“geographic variables exhibit

uncontrolled variance”)源于Anselin<sup>[17]</sup>提出的“空间异质性”(Spatial Heterogeneity),而后由Goodchild<sup>[6]</sup>在讨论地理学第一定律时将其作为地理学第二定律的候选。地理学第二定律概括了地理现象的另一个特点:地理现象的空间变化以及变化的差异性,即不可控的空间变化规律。这一规律对我们来说也不陌生,我们所生活的地理空间充满着变化,正因地理空间的这些变化,使其多样有趣,同时也不断地给人类创造促其成长的动力和挑战,使人类得以成就今天的社会文明。我们无法想象如果我们生活的地理空间没有第二定律所描述的规律,我们的生活会变得怎样的无趣和缺乏挑战性,也许人类的文明就没有现在这样的丰富多彩。

虽然地理学第二定律提出时间不长,但人们对第二定律所刻画的地理规律的认识却是悠久的,这些认识推动了地理分析的进一步发展。例如,在地理分析常用的空间推测中,由于增加了对空间异质性的认知,使常规只考虑空间自相关性(仅考虑地理学第一定律)的空间推测方法(如克里格、空间误差模型等)发展成为同时考虑地理学第一和第二定律的新型算法(如窗口克里格、类型克里格等),使空间推测的精度得到了进一步提高<sup>[18-20]</sup>;在空间分析中,Brunsdon等<sup>[21]</sup>和Fotheringham等<sup>[22]</sup>在常规的统计回归方法中加入了局域变化,将原来用于体现全局关系的回归参数(如回归系数和各个回归自变量的系数)转而用于体现各个局域上这种关系的不同变化,使其更好地揭示了地理现象的空间差异性。

上述的2个地理学定律具有2个共同的特点:描述性和概括性。所谓描述性是指地理学定律的陈述是以定性语言予以陈述,而不是直接以数学公式形式表达。这种描述性的表达方式更符合地理学的习惯,地理学到现在为止是一门以描述见长的学科,用定性描述的方式阐述地理规律更容易让人们理解其涵义,也更容易让人们接受。虽然其他领域的定律也用定性描述的方式表达,但这些定性描述的定律的数学表达式往往是具体而且确定的,而现有地理学定律的描述对其数学表达式则没有具体的限定。例如,地理学第一定律可以用半方差函数体现,也可以用距离衰减函数表达,或用空间自相关系数表达,还有人用泰森多边形的方式实现。这也是地理学定律在描述性方面的一个重要特点,这也体现了地理现象的复杂性和地理学定律的“包容性”。

所谓的概括性是指现有的地理学定律都是对已知规律(甚至地理常识)的总结、概括和提升,并不是从地理规律的发现开始命名的。人们对地理学第一定律所描述的规律的认识和应用远早于Tobler将它命名为地理学第一定律的时间,如在空间推测的内插研究中,南非统计学教授Daniel G. Krige早在1951年就将空间自相关特征用于对金及其它金属的地质勘探研究中<sup>[23]</sup>。同样,地理学第二定律所阐述的地理现象的空间异质性也早在其被命名为定律以前就被地理学者认识到了,如1927年,美国威斯康星大学地理系教授Richard Hartshorne在他的“Location as a factor in geography”一文<sup>[24]</sup>以及其后的文章<sup>[25-26]</sup>曾多次强调过地理现象的空间差异性(即空间异质性)。然而,不管是概括还是原始发现,这2个地理学的定律陈述了地理现象所遵循的2个普遍规律,即地理现象与空间位置的“必然关系”。

### 3 地理相似性:地理学的另一个定律?

Zhu等<sup>[9]</sup>在探索空间推测的理论依据时,将地理现象所遵循的另外一个规律命名为地理学第三定律,即“地理环境越相似,地理特征越相近”(The more similar geographic configurations of two points (areas), the more similar the values (processes) of the target variable at these two points (areas)),即地理相似性规律。地理相似性是指2个空间位置在地理环境(包括空间和非空间要素)上的综合相似性。这里需要说明3点:①这2个位置在空间上不一定相衔接;②地理特征是指所关注的目标地理变量(如滑坡、犯罪事件等)的特征;③在一个位置上的地理环境(地理要素的构成)与所关注的对象(目标地理变量)有关,如当所关注的变量是滑坡时,地理环境是由与滑坡产生有关的地理要素构成;如所涉及的变量是犯罪事件,地理环境是由与犯罪相关的地理要素构成。本文将从普遍性、独立性和应用性3个方面探讨地理相似性是否可以作为地理学的一个定律。

(1)普遍性。在地理研究中人们往往在相似的地理环境中寻找同一种地理现象。比如在土壤发生分类学中,我们认为具有相同的气候、母质、地形地貌、生物等条件的地方具有相同的土壤类型,即使这些地方在空间上不连续,但它们具有相同的地

理条件或条件的组合,有着相同的生物地球化学过程,具有相同的土壤形成过程,因此它们的土壤特征也应该相同(或很相似)<sup>[27-28]</sup>。又如在动物生境的研究中,我们经常去与动物曾经出现过地区相似的地方去寻找这些动物,这些“与曾经出现过的地方相似的地方”往往是通过地理要素特征(或条件的组合)的相似性来确定的。再如在城市犯罪学研究中,我们经常通过对收入、教育程度、社会设施等地理要素组成的社区条件(地理环境)的分析确定哪些社区(地区)的犯罪率高,并用这些地理环境去推测城市的哪些其它地区也可能有同样类型的犯罪事件<sup>[29]</sup>。从上述地理研究案例中可看出,自然界普遍存在地理相似性,其适用性与空间自相关性和空间异质性一样,具有普适意义。

(2)独立性。独立性是指地理相似性定律是否独立于地理学的第一和第二定律,即第三定律能不能从其他2个地理学定律中推导而得。首先,第一定律和第二定律都只考虑空间维,它们只考虑地理现象在空间距离这个单变量上的关系(相似或异质),忽略了地理现象中一个要素与其他地理要素之间的相互作用关系;而第三定律的核心是“地理环境”,关注的是地理现象的多要素组合特征,即一个点的某个地理要素(目标地理变量)与该点其他地理要素组合的关系。因此,从事物本质的机理看,第一定律和第二定律只是考虑地理现象在空间上的连续性特征,而第三定律涉及的是目标地理要素与其他地理要素组合在所在点上的相互关系或相互作用。从度量的角度看,第一和第二定律仅仅考虑同一地理要素在空间上2个点间距离的关系,而第三定律则是考虑一个点(或一个域)上的地理要素组合(地理环境)与另一个点(或域)上的地理要素组合间的相似性,以此进行度量,而不是仅用两点距离进行度量。

(3)应用性。应用性是指地理学第三定律应用于地理研究和解决实际问题方面的能力。Zhu等<sup>[9]</sup>以空间推测为例比较系统地阐述了地理学第三定律在应用上与第一和第二定律的不同之处。这里我们用两个例子阐述第三定律在应用上对第一和第二定律的创新。在阐述具体例子之前,我们简单介绍地理学第三定律的定量实现,其具体细节请参考文献[9]、[30]。第三定律的定量化的核心是求算每个已知点(样点)对研究区内其他每个点的代表性,即样点的个体代表性,这个个体代表性( $S_i^t$ )可

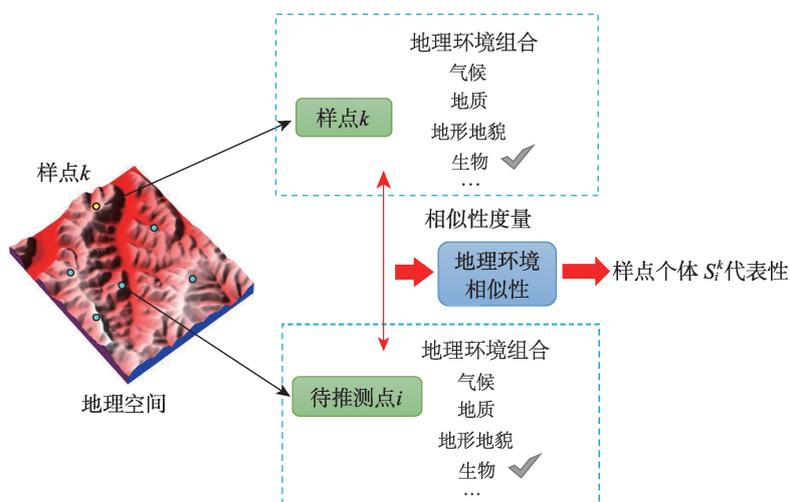
以用未知点( $i$ )的地理环境组合与已知样点( $k$ )的地理环境组合之间的相似性来度量(图1)。第三定律与第一和第二定律在实现上的重要区别在于:第一和第二定律在实现中求算样点集对整个研究区的代表性,而第三定律是求算单个样点的个体代表性。在估算目标地理变量在 $i$ 点的值时,我们只需要知道已有样点 $k(k=1, \dots, n; n$ 为样点数)各自对 $i$ 点的个体代表性和目标地理变量在样点 $k$ 的值。地理学第三定律与第一和第二定律在应用上的区别也在于这些个体代表性的应用。

案例1是利用地理学第三定律鉴定样点的不确定性和提升样点质量<sup>[31]</sup>。在滑坡危险度评价中,我们通常需要滑坡危险度与其他地理环境要素的关系,而这关系往往是从样点中确定,很明显,样点的质量与所得关系的准确性有着密切的关系。一般情况下,样点集由2种样本组成:正样本和负样本。正样本是指已有滑坡的点,而负样本是指没有滑坡的点。有滑坡的点很容易确定,因此正样本的质量往往较高;但负样本的采集就要复杂许多,一个地方现在和过去没有滑坡,不等于将来不会产生滑坡,也许这个地方具有滑坡的潜在条件,迄今没有产生滑坡只是这个潜在条件没有被激发。如果我们在野外直接采取负样本,我们也许可以避免将这些将来有可能产生滑坡的点采集为负样本,但野外直接采集负样本是相当费时、费力、费资源,因此人们往往会在没有产生滑坡的地区进行“室内”随机

采样,可想而知这样所得负样本的质量是很难保证的。Zhu等<sup>[31]</sup>利用地理学第三定律,将现有滑坡点的个体代表性作为负样本的不确定性,也就是,与现有滑坡点的地理环境越相似的点,在它作为滑坡负样本时,它的不确定性就越高”。利用这一不确定性筛选负样本,应用结果证明该方法获得的样本所推测出的滑坡危险度图,其精度高于以地理学第一定律的方法获得的样本所推测的滑坡危险度图的精度,这种利用地理学第三定律的方法可以消除在滑坡危险度推测中野外采集负样本的需求。

案例2是利用地理学第三定律消除或降低样本的空间偏差,提高样本的总体代表性<sup>[32]</sup>。目前所采用的地理分析方法中,绝大部分要求样点的空间分布具有良好的代表性,即样点的空间偏差小。随着空间定位技术的不断发展,社交网络数据或志愿者提供数据被越来越广泛地用于地理分析,但这些数据的空间代表性往往比较低,如何剔除这些数据中的空间偏差成为地理大数据时代的一个重要挑战。Zhang等<sup>[32]</sup>在利用志愿者地理数据(eBird网站数据)分析威斯康星红尾鹰的生境适宜度中,根据地理学第三定律,研发了样本空间偏差纠正方法,大幅降低了eBird网站数据中的空间偏差,有效地提高了红尾鹰生境适宜度的推测精度。而如何消除样本的空间偏差,对于地理学的第一和第二定律都是一个很大的挑战。

上述的案例都是展现地理学第三定律在自然



注:图中 $S_k^i$ 是样点 $k$ 对点 $i$ 的个体代表性,即样点 $k$ 的地理环境组合与点 $i$ 的地理环境组合的相似程度。

图1 地理学第三定律的定量实现

Fig. 1 Quantitative implementation of the Third Law of Geography

地理学中的应用,第三定律在人文社会地理学方面的应用还有待开展。人文社会地理的分析方法与自然地理的分析方法有很大相似之处,比如对样本的空间分布具有同样的要求,对人文社会地理现象的空间分布也采用空间推测方法。因此,第三定律对人文社会地理的分析也应有相似的作用。当然,在人文社会地理研究中对地理环境的描述较为复杂,比如人文社会的场景和连通性应该是描述地理相似性的重要部分<sup>[33]</sup>。

## 4 总结

尽管地理学的定律在形式上和提出的方式上与经典的力学定律有所区别,但仍是符合人们对“定律”给出的定义。地理相似性(地理学第三定律)与地理学第一(空间相关性)和第二定律(空间异质性)相比,它有着同样的普遍性,但这一普遍性与第一和第二定律所涉及的规律有着本质上的区别,不仅所涉及的内涵不一样,甚至比它们更广泛,更具有包含性,在应用上能解决第一和第二定律所面临的挑战,与地理学第一和第二定律相互补充,构成一个比较完整的地理解释体系。因此,可以认为地理相似性是地理现象所遵循的基本规律,将其称之为“地理学第三定律”,也许为之不过?

**致谢:**首先感谢陆锋研究员邀请我为本专辑撰写论文。2位审稿人对本文的内容提出了宝贵意见,本文中对第三定律的有些提法是采用了其中一位审稿人的建议,在此表示由衷的感谢。本文所涉及的内容是由我和我的很多同事和我的许多学生共同完成的,在此向他们表示感谢。

### 参考文献(References):

- [ 1 ] Hsu H, Lin B J. The kinetics of the stock markets[J]. *Asia Pacific Management Review*, 2002,7(1):1-24.
- [ 2 ] 李辉.论牛顿运动定律在信息社会学中的借鉴[J].*图书情报工作*,2010,54(16):44-49. [ Li H. Reference of Newton's Law of Motion in the information sociology. *Library and Information Service*, 2010,54(16):44-49. ]
- [ 3 ] 李子军,李根全,白旭芳.牛顿力学形式和相对论力学的协变性[J].*楚雄师专学报*,2002,21(6):22-23,39. [ Li Z J, Li G Q, Bai X F. The form of Newton's mechanics and the covariance of relativistic mechanics[J]. *College Physics*, 2002,21(6):22-23,39. ]
- [ 4 ] 王学建.牛顿第二定律的基本特性及应用[J].*科技信息*, 2012(28):554,556. [ Wang X. Basic characteristics and application of Newton's Second Law of Motion[J]. *Science & Technology Information*, 2012(28):554,556. ]
- [ 5 ] Tobler W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970,46(Supplement):234-240.
- [ 6 ] Goodchild M F. The validity and usefulness of Laws in Geographic Information Science and Geography[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94:300-303.
- [ 7 ] Longley P A, Goodchild M F, Maguire D, et al. *Geographic information systems and science*[M]. Chichester, NY: John Wiley and Sons, 2001.
- [ 8 ] Sui D Z. Forum: Tobler's first law of geography: A big idea for a small world?[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004,94:269-77.
- [ 9 ] Zhu A X, Lv G, Liu J, et al. Spatial prediction based on Third Law of Geography[J]. *Annals of GIS*, 2018,24(4): 225-240.
- [10] Cressie N A C. *Statistics for spatial data*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- [11] Burrough P A, MacDonnell R A. *Principles of Geographical Information Systems*[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [12] 陈述彭,鲁学军,周成虎.地理信息系统导论[M].北京:科学出版社,1999. [ Chen S P, Lu X J, Zhou C H. *Introduction to Geographical Information System*[M]. Beijing: Science Press, 1999. ]
- [13] 周成虎,裴韬,陆锋,等编著.地理信息系统空间分析原理[M].北京:科学出版社,2011. [ Zhou C H, Pei T, Lu F, et al. *Principle of Spatial Analysis in Geographic Information System*[M]. Beijing: Science Press, 2011. ]
- [14] Longley P A, Goodchild M F, Maguire D, et al. *Geographic Information Systems and Science*[M]. JNew Jersey: John Wiley and Sons, 2015.
- [15] 闫国年,袁林旺,俞肇元.地理学视角下测绘地理信息再透视[J].*测绘学报*,2017,46(10):1549-1556. [ Lv G N, Yuan L W, Yu Z Y. Surveying and mapping geographical information from the perspective of geography[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(10):1549-1556. ]
- [16] 汤国安,刘学军,闫国年,等.地理信息系统教程(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2019:241-243. [ Tang G A, Liu X J, Lv G N, et al. *Textbook of Geographical Information System (Second Edition)*[M]. Beijing: High Education Press, 2019:241-243. ]
- [17] Anselin L. What is special about spatial data? Alternative perspectives on spatial data analysis, Technical Report 89-

- 4[R]. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis, 1989.
- [18] Haas T C. Kriging and automated variogram modeling within a moving window[J]. *Atmospheric Environment*, 1990,24A:1759-1769.
- [19] Kitanidis P K, Shen K F. Geostatistical interpolation of chemical concentration[J]. *Advances in Water Resources*, 1996,19(6):369-378.
- [20] Pardo-Iguzquiza E, Dowd P, Grimes D. An automatic moving window approach for mapping meteorological data[J]. *International Journal of Climatology*, 2005,25:665-678.
- [21] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996,28: 281-298.
- [22] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships[M]. Chichester, U K: John Wiley and Sons, 2002.
- [23] Krige D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 1951,52(6):119-139.
- [24] Hartshorne R. Location as a factor in geography[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1927,17 (2):92-99.
- [25] Hartshorne R. The nature of geography: A critical survey of current thought in the light of the past[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1939,29(3):173-412.
- [26] Hartshorne R. Perspective on the Nature of Geography [M]. Chicago: Rand McNally, 1959.
- [27] Dokuchaev V V. 1883. Russian Chernozem. In: Selected works of V. V. Dokuchaev, Moscow, 1948,1,14-419. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Ltd. (for USDA- NSF), Publ. by S. Monson, 1967. (Transl. into English by N. Kaner).
- [28] Jenny H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology[M]. Courier Corporation, 1994.
- [29] Wortley R, Townsley M, eds.. Environmental Criminology and Crime Analysis (Vol.18) [M]. London: Taylor & Francis, 2016.
- [30] Zhu A X, Liu J, Du F, et al. Predictive soil mapping with limited sample data[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015,66(3):535-547.
- [31] Zhu A X, Miao Y, Liu J Z, et al. A similarity-based approach to sampling absence data for landslide susceptibility mapping using data-driven methods[J]. *Catena*, 2019, 183:104188.
- [32] Zhang G, Zhu A X. A representativeness- directed approach to mitigate spatial bias in VGI for the predictive mapping of geographic phenomena[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019,33(9): 1873-1893.
- [33] Zhu D, Zhang F, Wang S, et al. Understanding place characteristics in geographic contexts through graph convolutional neural networks[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020,110(2):408-420.
- [34] Biljecki F. A scientometric analysis of selected GIScience journals[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016,30(7):1302-1335.