

基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨

董玉祥^{1,2}, 徐 茜¹, 杨 忍¹, 徐成东³, 王钰莹¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;
2. 中山大学新华学院, 广州 510520; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 热带北界一直是中国综合自然区划研究中争议较大的问题之一, 不同学者基于不同区划指标和方法等划定的中国热带北界界线差异较大。基于空间分异性的综合自然区划思想, 依托最新的基于统计学原理的地理探测器模型, 以气候要素为主导指标, 辅以土壤类型与作物熟制等, 探讨中国陆地热带北界的界线。结果表明: ① 依据地理探测器模型所确定的中国陆地热带北界, 自西向东依次经过滇、桂、粤和闽的临沧、思茅、玉溪、个旧、百色、马山、贵港、梧州、肇庆、广州、惠州、河源、梅州、漳州、泉州和莆田等地附近, 其与最冷月均温 12℃ 等温线、赤红壤与红壤界线及双季稻或双季稻连作喜温旱作与单(双)季稻连作喜凉旱作的分界线等基本吻合; ② 利用地理探测器确定的中国陆地热带北界新界线的各项指标决定力 q 值的均值为 0.40, 分异明显, 满足层内同质性和层间异质性最大的区划原则, 完全达到了热带与亚热带的区域空间异质性要求, 其划分结果合理可信, 表明地理探测器模型可为综合自然区划提供良好的技术支撑。

关键词: 地理探测器; 陆地热带北界; 综合自然区划; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201701011

1 引言

综合自然区划是根据地表自然界的相似性和差异性进行自然区域的划分, 划分出的单位符合自然综合体的特征及其发生、发展与分布的规律^[1-2]。综合自然区划研究一直是自然地理学关注和研究的重点与核心^[3], 长期以来在中国更是备受关注, 学者们先后曾提出多个全国性的综合自然区划方案, 如罗开富^[4]依据自然特征将全国划分为 7 个基本区; 黄秉维^[5]强调应突出自然地理地带性规律, 将全国划分为 3 大自然区、6 个热量带、18 个自然地区及亚地区、28 个自然地带和亚地带、90 个自然省; 任美镔等^[6-7]提出与黄秉维方案的不同观点, 将全国划分为 8 个自然区, 并指出各区的资源环境整治问题; 席承藩等^[8]对黄秉维方案简化为 3 大区域、14 个带、44 个区; 侯学煜等^[9]依据温度及大气、水热条件组合状况的不同进行区划以指导农业发展方向; 赵松乔^[10]则将全国划分为 3 大区、7 个自然地区、33 个自然区; 傅伯杰等^[11]依据社会、经济、自然的复合生态系统特征, 综合考虑了自然地域分异及人类活动的影响进行生态环境区划。由于区划目的及指标选择等的不同, 加之自然地带间的过渡性及其表达的复杂性, 区划界线等方面常存在争议, 如关

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371030) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371030]

作者简介: 董玉祥(1964-), 男, 河南西平人, 博士, 教授, 主要从事综合自然地理教学和海岸风沙地貌及土地资源开发利用与保护研究。E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 徐茜(1984-), 女, 江苏沐阳人, 博士生, 主要研究方向为土地资源开发利用与保护。

E-mail: xuxi3@mail2.sysu.edu.cn

于热带的定义,国际上仍没有一个明确的定义^[12],学者们以气候^[13-14]、植被、土壤^[15-16]等为依据,Terjung等^[17]汇总的热带划分方法就多达169种。由于季风气候的特殊性,不同学者在综合自然区划中对中国热带北界的划定一直存在较大争议^[18-23],不同方案中提出的界线位置差异较大,如任美镠等^[24-25]、侯学煜^[26]、曾昭璇^[27]等主要以热带地理景观的区域差异性为依据认为中国的热带北界应为南岭一带,郑度等^[28]、黄秉维^[29]、钟功甫等^[30]、张宝堃^[31]、赵松乔^[32]和丘宝剑^[33]等多强调短暂低温霜冻等限制条件将热带北界划至雷州半岛附近。同时,受数据资料及技术条件所限,早期综合自然区划研究多以定性、专家集成方法为主,随着20世纪70年代计量地理学的兴起及90年代中期后“3S”技术的发展,综合自然区划的研究方法逐渐趋于定量化和综合化,在传统的叠置法、主导标志法、地理相关分析法和土地类型图法等区划方法基础上^[34-35],诸如聚类分析^[36]、主成分分析^[37]、不确定性推理法^[38]、SOFM神经网络分析^[39]、格网分析法^[40]和模糊集合理论^[41]等定量方法的应用较好地提高了综合自然区划结果的客观性及数学验证水平,尤其是籍于“3S”技术能够实现自然地理指标的空间量化表达从而更利于揭示自然地理空间格局特征的技术优势^[42],以指标量化和模型为主的“3S”技术的应用更好地解决了综合自然区划中区划指标的空间属性及其表达水平问题^[43],更促进了综合自然区划研究水平和区划界线精度的提高。近期,由王劲峰等^[44]提出的地理探测器模型以能够客观反映地理要素对自然综合体的影响力及度量空间异质性而受到关注,已在景观生态格局^[45]、城市碳排放^[46]、健康风险评估^[47-48]、城镇化^[49]、乡村空间优化^[50]、灾害地理^[51]、生态环境^[52]等方面的影响因素及机理研究中得到应用且取得了良好的效果,考虑到综合自然区划的核心是空间分异性即同级区划区域内要素差异性最小、不同区域之间要素差异性最大,正与地理探测器模型能够充分表征的空间异质性功能相吻合,故针对中国热带北界争议较大的研究现状,基于地理探测器模型方法探寻中国热带北界的界线,但因台湾地区气候数据的缺失等只进行中国陆地热带北界的研究。具体将依据主导性原则,在对已有主要区划方案结果的合理性探测识别与比较的基础上,选取主要气候要素为区划指标,基于气象站点长时间序列数据,利用空间插值方法实现气候数据的空间定量化,结合土壤类型和农作物熟制等指标,运用地理探测器模型进行中国陆地热带北界的划定,并定量识别其空间异质性特征,以丰富和明确对中国陆地热带北界的认知,尝试新技术、新方法对综合自然区划研究中的应用。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

基于区域的相似性与差异性规律进行自然区划,划分出的同一自然区应该具有发生的同一性特征,不同自然区域间应具有显著的区域差异性^[11]。地理探测器模型^[53](<http://www.geodetector.org/>)可较好表达同一区域内的相似性、不同区域之间的差异性,该模型主要是基于统计学原理的空间方差分析,通过分析层(stratum,统计学名词,可对应地理空间中的“分区”)内方差与层间方差的异同来定量表达研究对象的空间分层异质性(空间异质性)。如果研究对象在不同分区内部较为均一,并且不同分区之间的差异较大,则说明研究对象的空间异质性较强,而其空间分区的确定常依据于一些关键指标。本研究应用地理探测器模型,依据气候等区划指标揭示区域间的分层异质性,进行中国热带陆地北界划定。地理探测器模型的公式表达如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中: q 为某指标的空间异质性, 此指标用于划分中国陆地热带北界; N 为研究区全部样本数; σ^2 为指标的方差; $h = 1, 2, \dots, L$, h 标识分区, L 表示分区数目。 $q \in [0, 1]$, q 的大小反映了空间分异的程度, q 值越大, 表示空间分层异质性越强, 反之则空间分布的随机性越强。当 $q = 0$ 时指示研究对象不存在空间异质性; 当 $q = 1$ 时指示完美的空间异质性。

热带陆地北界划分的主要影响决定力因子是气候指标, 具体选择多年平均月均温、最冷月均温、最低日均温、极端最低气温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 天数、日最低气温 $\leq 0^\circ\text{C}$ 天数和日最低气温 $\leq 2^\circ\text{C}$ 天数等 8 项气候指标为影响因素, 次级区域包括热带与亚热带两层, $L = 2$, 不同气候指标应在这两层中存在层内差异最小、层间差异性最大。同时, 国内已有主要的陆地热带北界划分方案, 在分析模型中将对应不同的分层异质性特征。

研究区的范围北界, 依据黄秉维区划方案^[5], 取自中国综合自然区划中方案的亚热带北界纬度最低的滇、川、藏三省区交界处的中甸县南端 (27°N , 100°E), 以保证研究区内仅包含有热带与亚热带 2 个热量带。在上述研究区内, 基于 ArcGIS 的格网技术, 以 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 格网为一个统计单元对研究区域进行网格化的样本划分, 中国陆地热带北界划分研究区的全部样本数 (N) 共有 45201 个, 运用空间插值的方法对所有分析指标空间插值, 然后依据已有不同区划方案的划分原则, 将 45201 个样本划分为热带与亚热带两层, 基于全部样本经地理探测器模型运行得到 q 统计值。当 q 越大, 说明影响因子对热带与亚热带的界线划分影响越大, 相同热量带内空间同质性越强, 不同热量带内空间异质性越强。地理探测器的 q 统计值既能表征不同区划指标 (因子) 对中国陆地热带北界影响的显著性程度, 也可揭示其空间的分异性。

2.2 数据来源

具体区划指标数据中的气候数据来源于中国 756 个基本基准地面气象观测站及自动站 1981-2010 年的日值数据集 (中国气象共享网 <http://data.cma.cn>), 主要包括多年平均月均温、最冷月均温、最低日均温、极端最低气温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 天数、日最低气温 $\leq 2^\circ\text{C}$ 天数和日最低气温 $\leq 0^\circ\text{C}$ 天数, 对点值数据运用克里金内插法得到, 所有栅格数据均为 250 m 空间分辨率。此外, 土壤数据来源于 1:100 万中国土壤数据库, 植被数据来源于中国 1:400 万植被图, 均下载于中国科学院国家地球系统科学数据共享网 (<http://www.geodata.cn/>)。

3 结果与分析

3.1 区划指标识别

基于不同学者对中国热带北界划分的比较与分析, 利用地理探测器从不同区划方案中涉及的主要区划指标中识别出中国热带北界界线的关键影响因子, 将其作为中国陆地热带北界界线的区划指标。先前对中国热带北界进行划分的研究较多^[54], 选择其中具有重要影响力的 6 种区划方案^[5, 19-21, 25, 27] (图 1), 并从这些区划方案的主要区划指标中选取被采用较多、能够反映区域特征的多年平均月均温、最冷月均温、最低日均温、极端最低气温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温、日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 天数、日最低气温 $\leq 0^\circ\text{C}$ 天数和日最低气温 $\leq 2^\circ\text{C}$ 天数等作为区划指标识别对象 (图 2), 其中除极端最低气温为 1981-2010 年的 30 年中极端最低气温最小值外, 其余指标均为 1981-2010 年均值数据。

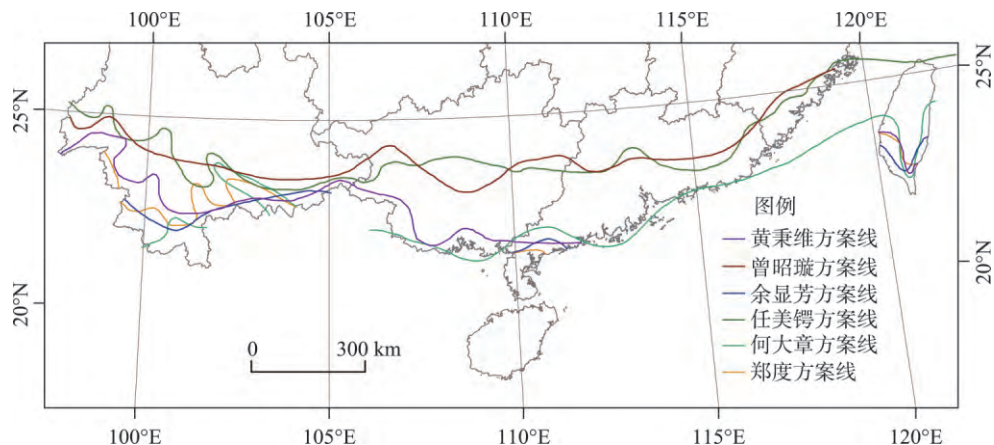


图1 中国陆地热带北界的主要划分方案

Fig. 1 Different regionalization schemes of the northern border of the tropical zone of China's mainland

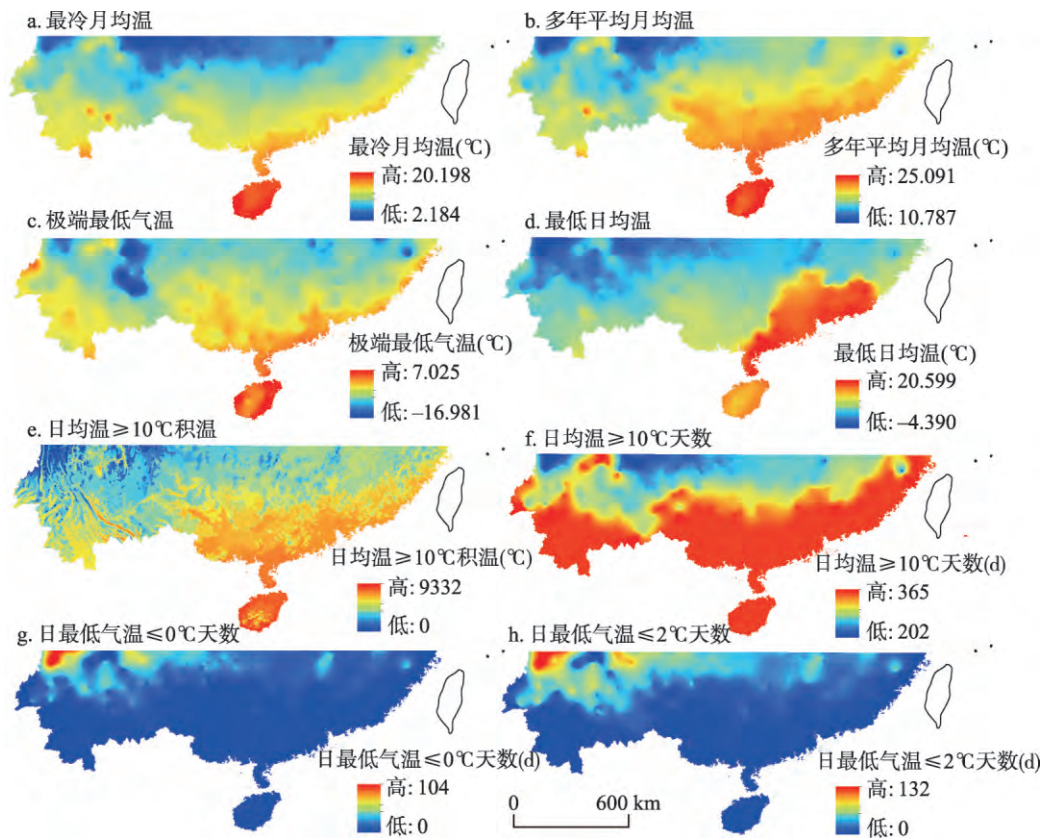


图2 1981-2010年中国陆地热带主要气候指标的多年平均值

Fig. 2 Annual average values of main climatic indexes of the tropical zone of China's mainland from 1981 to 2010

基于地理探测器模型，可定量获取不同区划方案所划定的陆地热带北界的影响决定力程度，得到不同区划界线的影响因子决定力 q 值（表1）。不同区划方案的陆地热带北界不同，划分出的热带与亚热带区域范围即不同，因而运用地理探测器对研究区全部45201个样本测评的 q 值就会具有差异。例如，何大章与余显芳方案同样采用日均温 $\geq$

表1 中国陆地热带北界界线划定指标的探测验证结果(*q*值)
Tab. 1 Detection results of the delineation index of the northern border of the tropical zone of China's mainland (*q* value)

区划方案	最冷月均温	极端最低气温	日均温≥10℃积温	多年平均月均温	日均温≥10℃天数	日最低气温≤2℃天数	最低日均温	日最低气温≤0℃天数
黄秉维方案	0.24	0.20	0.11	0.10	0.10	0.07	0.07	0.05
曾昭璇方案	0.11	0.47	0.37	0.37	0.41	0.29	0.35	0.19
余显芳方案	0.05	0.15	0.10	0.09	0.07	0.05	0.09	0.03
何大章方案	0.20	0.20	0.15	0.19	0.07	0.19	0.19	0.19
任美镔方案	0.52	0.52	0.34	0.35	0.41	0.30	0.32	0.20
郑度方案	0.23	0.16	0.09	0.09	0.07	0.05	0.07	0.03
平均值	0.23	0.28	0.19	0.20	0.19	0.16	0.18	0.12

10℃积温7500℃和最冷月均温15℃指标进行区划，但由于所划分界线的范围差异，其所对应的热带范围内所有日均温≥10℃积温的样本方差值必然不同，因而测评出的两个方案对于日均温≥10℃积温指标的*q*值也不同。从上述6种区划方案的影响因子决定力*q*值测评结果看（表1），极端最低气温、最冷月均温、多年平均月均温的*q*值均值最大，分别为0.28、0.23、0.20；其余依次为日均温≥10℃积温（*q*均值=0.19）、日均温≥10℃天数（*q*均值=0.19）、最低日均温（*q*均值=0.18）、日最低气温≤2℃天数（*q*均值=0.16）和日最低气温≤0℃天数（*q*均值=0.12），依此可以确定极端最低气温、最冷月均温和多年平均月均温是决定中国陆地热带北界界线最为重要的3项气候指标，该3项指标应可反映热带与亚热带地区的空间异质性，即层内方差最小、层间方差最大。

3.2 区划界线划定

依据上述分析结果，选取“决定力”强度（地理探测器*q*值）最大的最冷月均温、极端最低气温和多年平均月均温3项指标，运用地理探测器模型定量分析其不同取值时对中国陆地热带北界界线的“决定力”（*q*值），以确定指标在区划时取值的合理性（表2，图3）。地理探测器运行结果（表2），比较各指标不同取值时的*q*值，最冷月均温为12℃时其地理探测*q*值为最大，数值为0.60；多年平均月均温是在19℃时地理探测*q*值为最大，数值为0.57；极端最低气温为0℃时其地理探测*q*值为最大，数值为0.38。相比之下，各区划指标及其不同取值的地理探测*q*值以最冷月均温等于12℃时为最大，说明其为最为关键的影响因子，据此可先以最冷月均温12℃等温线为中国陆地热带北界的基本划定依据。

以最冷月均温12℃等温线（图3）为基础，以土壤类型、植被类型及作物熟制的热带特征为依据，对最冷月均温等于12℃等温线进行适当修正。其中，云南省临沧县与云龙县交界处为无量山、老别山山区，个旧市范围内的最冷月均温等于12℃等温线由南向

表2 主要区划指标对中国陆地热带北界的决定力(*q*值)
Tab. 2 Geographic detection power of the main regionalization indexes of the northern border of the tropical zone of China's mainland (*q* value)

最冷月均温(℃)	<i>q</i> 值	多年平均月均温(℃)	<i>q</i> 值	极端最低气温(℃)	<i>q</i> 值
12	0.60	19	0.57	0	0.38
13	0.48	20	0.53	1	0.30
14	0.34	21	0.51	2	0.23
15	0.26	22	0.31	3	0.16
16	0.22	23	0.17	4	0.11
				5	0.08

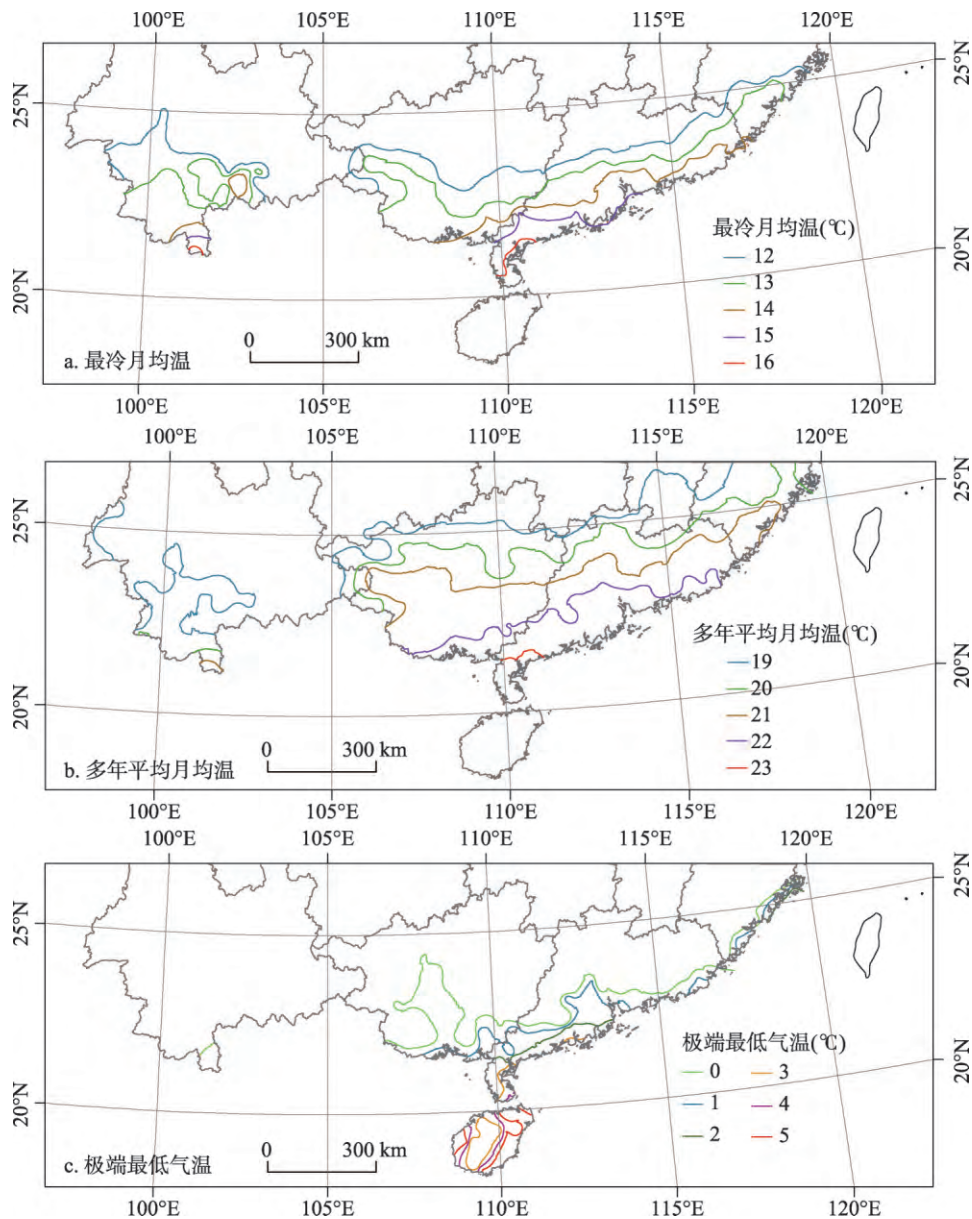


图3 中国陆地热带北界区划主要气候指标的取值范围

Fig. 3 Value range of main climatic indexes for the regionalization of the northern border of the tropical zone of China's mainland

北明显突出，红壤及紫色土不符合热带土壤类型，单（双）季稻连作喜凉旱作的作物熟制不符合热带特征；广西省大明山附近的最冷月均温等于12℃等温线由北向南明显突出，未包含区域表现为赤红壤与双季稻或双季稻连作喜温旱作的热带特征；福建武夷山附近最冷月均温等于12℃等温线纬度偏高，出现红壤、黄壤亚热带土壤类型及单（双）季稻连作喜凉旱作的特征，对以上进行修正后获得中国陆地热带北界的新界线（简称“本文界线”）（图4），其自西向东依次经过滇、桂、粤和闽的临沧、思茅、玉溪、个旧、百色、马山、贵港、梧州、肇庆、广州、惠州、河源、梅州、漳州、泉州和莆田等

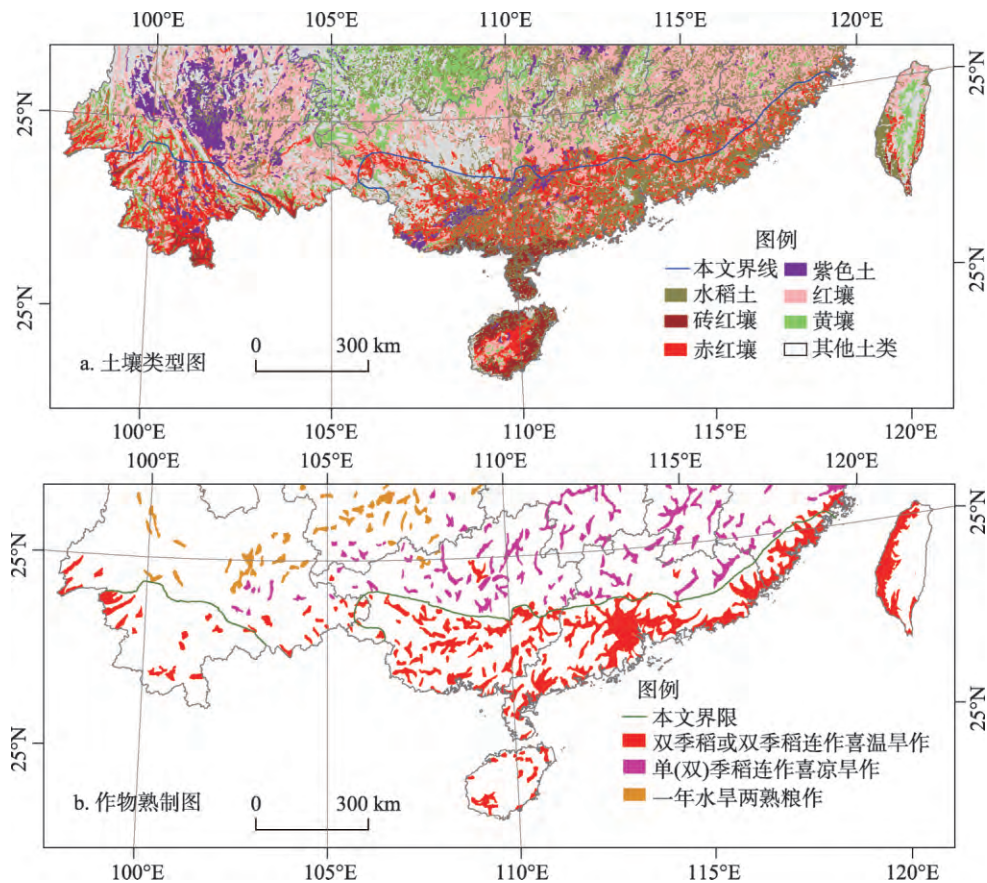


图4 中国陆地热带北界新界线在土壤类型图及作物熟制图中的位置
Fig. 4 The new northern border of the tropical zone of China on maps of soil type and multiple cropping

地附近，其纬度南到22.8°N、北可至25.3°N。

采用地理探测器模型对上述新界线进行定量探测识别，结果表明本文界线8项气候指标的地理探测 q 值较大并显示出明显的优势度（表3），其中最冷月均温的 q 值最大为0.57，极端最低气温、多年平均月均温、日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、最低日均温和日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数的地理探测 q 值分别为0.50、0.44、0.42、0.41和0.40，仅日最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数及日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数的地理探测 q 值相对较低分别为0.29和0.18，但也较已有6种

表3 主要区划指标对中国陆地热带新界线的决定力(q 值)
Tab. 3 Geographic detection power of the main regionalization indexes of the new northern border of the tropical zone of China's mainland

指标	最冷月均温	极端最低气温	日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	多年平均月均温	日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数	日最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数	最低日均温	日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数	平均
q 值	0.57***	0.50***	0.42***	0.44***	0.40***	0.29***	0.41***	0.18***	0.40
平均值	0.22	0.27	0.18	0.19	0.17	0.14	0.17	0.10	/
最大值	0.52	0.52	0.37	0.37	0.41	0.30	0.35	0.20	/
最小值	0.05	0.15	0.09	0.09	0.07	0.05	0.07	0.03	/

注：***表示 q 值在0.001水平上显著（ $p < 0.001$ ）；“平均值”指黄秉维等6种区划方案的指标决定力探测 q 值的平均值，“最大值”与“最小值”同理。

区划方案的均值要大并接近其最大值, 相比而言本文界线的各指标 q 值的均值为0.40, 新界线的各气候指标地理探测 q 值远较已有区划方案的平均值大且多超出其最大值, 同时各指标 p 值也均通过0.001水平的显著性统计检验。本文界线地理探测 q 值的比较优势, 表明其可最充分地反映热带和亚热带区域之间的差异性即层间异质性, 说明了该陆地热带北界界线的合理与可信。

3.3 区划界线分析

最冷月均温是热带作物越冬的重要保证^[55], 橡胶、咖啡与剑麻等热带作物一般在15℃以上才开始生长, 当日均温较长时间处于10~15℃时热带作物会因“抑制性低温”停止或缓慢生长^[33], 但偶尔的缓慢或停止生长并不代表作物死亡或严重影响农业生产, 因此在深受季风气候影响的中国热带地区出现较少的日均温小于15℃情况应是可被认可的, 故本文利用地理探测器模型分析结果主要是以最冷月均温12℃为区域界线划定依据。同时, 作为杀伤性低温的极端最低日均温反映作物受寒害情况, 一般认为其应不低于5℃^[55], 值得强调的是本文使用的指标为极端最低气温, 表示1981-2010年日极端最低气温的最小值, 在实际生产中真正有危害的是霜冻, 一般认为0℃以下产生霜冻, 本文界线划定的中国热带北界以南范围内绝少出现日最低温度0℃的情况, 也符合热带区域范围的要求。另外, 本文界线与赤红壤和红壤的分界基本吻合, 也和双季稻或双季稻连作喜温旱作与单(双)季稻连作喜凉旱作的分界基本一致(图4), 明显显示出热带与亚热带区域间的差异。故本文对中国陆地热带北界新界线的划定, 应合理且符合实际。

与已有研究结果比较, 本文中国陆地热带北界的新界线与任美镔方案和曾昭璇方案的界线较为接近, 与黄秉维方案等4种方案的区划界线存在较大差异, 核心主要在于热带北界是赤红壤与红壤的分界还是砖红壤与赤红壤的分界(图5), 本文方案、任美镔方案和曾昭璇方案基本是以赤红壤与红壤分界线为界、由东向西赤红壤与红壤的分界清晰, 黄秉维方案等多以砖红壤与赤红壤界线明显的雷州半岛以北为界, 尤其是黄秉维方案的热带北界与砖红壤和赤红壤界线极为吻合, 广东、广西热带范围以砖红壤覆盖为主, 但云南省南部与高原地形有关其赤红壤与砖红壤之间界线并不分明, 所划分出的热带范围内赤红壤与砖红壤混杂。考虑到“赤红壤的性质更接近于砖红壤, 砖红壤是热带经济作物所适宜的土壤类型, 而赤红壤是这类热带作物有可能引种、繁殖的土壤类型”^[56], 一般也会将赤红壤与砖红壤的土壤粘土矿物合为一个地带, 故倾向于把中国陆地热带北

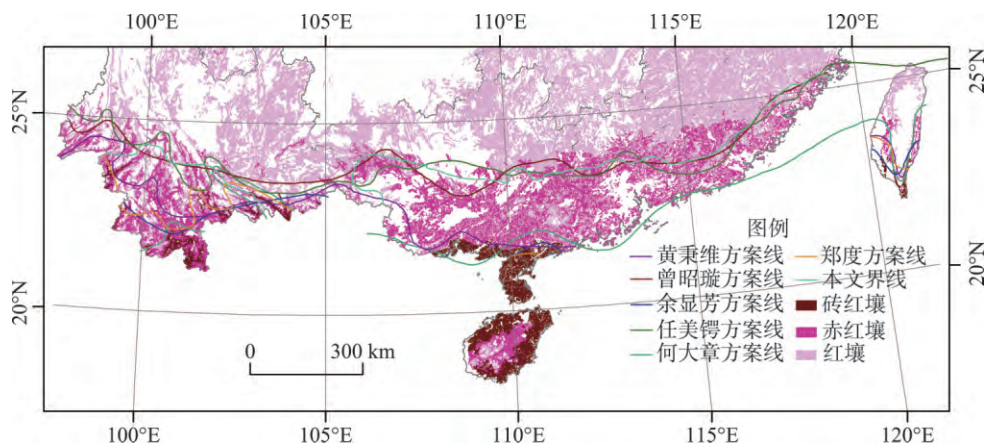


图5 中国陆地热带北界不同区划方案界线与土壤类型分布

Fig. 5 The northern border of the tropical zone of China with different regionalization schemes and soil type distribution

界与赤红壤和红壤的界线对应。另外,地处热带的海南岛土壤类型分异也表明,因地势原因海岛四周为砖红壤而中心为赤红壤,也不能以此确定以砖红壤为主的海岛四周为热带、以赤红壤为主的中心区域为亚热带,而其均应为热带地区。

在自然植被分布方面,热带北界争议的焦点在于对“地带性植被”认识的差异。一般认为海拔小于300~350 m的平地植被才属于地带性植被^[26],而地带性植被的热带雨林被认为是划分热带的重要指标。但是受人类活动长期影响中国大部分地区的原始植被基本不复存在^[54],故划分标准中会更多考虑农作物、经济作物的生长情况及作物熟制。就作物熟制而言,所有区划方案中划定的热带区域内均为双季稻或双季稻连作喜温旱作,本文方案及任美镔方案和曾昭璇方案的界线基本与双季稻或双季稻连作喜温旱作和单(双)季稻连作喜凉旱作的分界线吻合,应较具合理性。

4 结论与讨论

4.1 结论

遵循综合自然区划的主导因素原则及综合性原则等,基于地理探测器揭示分层异质性的特点,以气候要素为基本指标,辅以土壤类型、植被类型和作物熟制等,通过对不同区划方案的探测识别,运用地理探测器方法划分出了具有统计学依据的中国陆地热带北界界线。其中:①中国综合自然区划中影响与作用热带北界的主要气候指标的定量识别结果,以极端最低气温、最冷月均温和多年平均月均温的影响因子决定力 q 值为最大,表明这3项指标对中国热带北界界线具有主要影响,且能够实现热带与亚热带两个区域的层内最大同质性及层间最大异质性;②根据对极端最低气温、最冷月均温和多年平均月均温3项主要指标的探测识别,其中以最冷月均温12℃的地理探测 q 值为最大($q=0.60$),应为关键性区划因子,故基于最冷月均温12℃等温度线辅以土壤及作物熟制修正,划定中国陆地热带北界界线,其大致由西向东依次经过滇南的临沧、思茅、玉溪和个旧,桂东南的百色、马山、贵港和梧州,广东的肇庆、广州、惠州、河源和梅州,及闽东南的漳州、泉州和莆田等附近,地理探测器验证该界线各指标 q 值均值为0.40,影响决定力最强,且其各指标 p 值均通过0.001水平下的显著性统计检验,显示出明显的区域分异性;③上述热带北界,大致在土壤类型方面为赤红壤与红壤的分界,作物熟制方面与双季稻或双季稻连作喜温旱作和单(双)季稻连作喜凉旱作的分界线较吻合。

4.2 讨论

本研究中应用新的方法揭示区域差异性特征,划定中国热带北界界线,并应用土壤及植被、作物熟制等对区划结果进行验证,所提出的中国陆地热带北界界线与任美镔方案及曾昭璇界线较为接近但范围略小,较黄秉维方案和郑度方案等的界线明显偏北,其主要差异表现为土壤类型方面本文界线为赤红壤与红壤分界,而黄秉维方案和郑度方案等则接近于赤红壤与砖红壤分界。研究表明,地理探测器模型较之前的专家集成等方法,可更加科学、客观和高精度地识别自然区划的空间异质性,完全适用于综合自然区划的研究。

但研究结果尚存在需进一步讨论之处:①本文划定的中国热带北界界线,是完全基于地理探测器所揭示的空间分异性而确定的,采用该方法并取得可信结果的前提与基础是已有的区划方案及其指标,如果没有前人的充足研究其区划结果及其精度必然深受影响,同时该模型在表现空间异质性时须有多指标因子的相互印证以体现区域综合特征的

差异,故运用地理探测器模型进行综合区划研究需对此予以充分注意;② 土壤、植被及作物熟制等虽受气候条件的影响及制约,但难以完全反映气候特征,且其对气候变化具有一定的滞后性^[33],另外随着科学技术水平的提高,土壤性质、植被品种及作物熟制等也会有所改变,因而完全以土壤、植被及作物熟制等进行区划可能会存在一定误差,其作为参考的辅助性指标应更合理,在综合自然区划中主要气候指标仍应作为主导因素采纳;③ 本文研究对象属大尺度、宏观性的区划界线,依照综合自然区划的区域空间连续性原则(区域共轭原则),要求各个自然地理区保持完整性而不出现“飞地”^[3],故在界线划定时为体现宏观区域的自然综合特征会因综合而忽略局部分异现象,但因局地地形和小气候等影响造成的小尺度的局部景观分异也必然存在,如云南西部北纬27°油棕能够开花结果、四川攀枝花及贵州南部部分地区可以种植芒果等热带作物,此将是地理探测器在更小尺度应用中需探讨的重要问题之一。④ 热带与亚热带之间自身就存在过渡渐变特征,气候又一直处于动态变化之中,表征气候特征的指标也多种多样,不同时间尺度下的气候指标亦存在一定差异,不同方法划分出的热带北界也必有不同,但均需保证所划定的界线内区域特征最为显著和突出,同时热带北界应是一条活动而非固定不变的线^[19],因此,在全球变化的大背景下,该界线的变化等还亟待进一步分析和研究^[57-59]。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所郑度院士和吴绍洪研究员等及审稿专家对本文提出了的意见和建议,谨致谢忱!

参考文献(References)

- [1] Bailey RG. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management*, 1983, 7: 365-373.
- [2] Bailey R G, Zoltai S C, Wiken E B. Ecological regionalization in Canada and the United States. *Geoforum*, 1985, 16: 265-275.
- [3] Zheng Du, Yang Qinye, Wu Shaohong. *Physical Geography Pandect in China*. Beijing: Science Press, 2015: 339-347. [郑度, 杨勤业, 吴绍洪. 中国自然地理总论. 北京: 科学出版社, 2015: 339-347.]
- [4] Luo Kaifu. A preliminary study of China's natural geographical zone. *Acta Geographica Sinica*, 1954, 20(4): 379-394. [罗开富. 中国自然地理分区草案. 地理学报, 1954, 20(4): 379-394.]
- [5] Huang Bingwei. A preliminary study of China's comprehensive natural regionalization. *Science Bullitin*, 1959, 9(18): 594-602. [黄秉维. 中国综合自然区划草案. 科学通报, 1959, 9(18): 594-602.]
- [6] Ren Mei'e, Yang Renzhang. Some issues on China's natural regionalization. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 27: 66-74. [任美锷, 杨纫章. 中国自然区划问题. 地理学报, 1961, 27: 66-74.]
- [7] Ren Mei'e, Bao Haosheng. *China's Natural Regionalization and Development*. Beijing: Science Press, 1992. [任美锷, 包浩生. 中国自然区域及开发整治. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [8] Xi Chengfan, Zhang Junmin, Qiu Baojian, et al. *China's Natural Regionalization Profiles*. Beijing: Science Press, 1984. [席承藩, 张俊民, 丘宝剑, 等. 中国自然区划概要. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [9] Hou Xueyu, Jiang Shu, Chen Changdu. Opinions on development orientation of agriculture, forestry, livestock farming, sideline and fishery of each natural region of China. *Science Bullitin*, 1963(9): 8-26. [侯学煜, 姜恕, 陈昌笃. 对于中国各自然区的农、林、牧、副、渔业发展方向的意见. 科学通报, 1963(9): 8-26.]
- [10] Zhao Songqiao. A new scheme for comprehensive physical regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38(1): 1-10. [赵松乔. 中国综合自然区划的一个新方案. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10.]
- [11] Fu Bojie, Liu Guohua, Chen Liding, et al. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6. [傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.]
- [12] Oliver J E. The history, status and future of climatic classification. *Physical Geography*, 1991, 12: 242-246.
- [13] Koppen W. Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag, und jahreslauf. *Petermanns Mitteilungen*, 1918, 64(193): 193-203.
- [14] Pelzer K J, Gourou P, Laborde E D. The tropical world. *Pacific Affairs*, 1955, 28(4): 383.
- [15] Walter H, Breckle S W. *Ecological Systems of the Geobiosphere 1: Ecological Principles in Global Perspective*. Berlin:

- Springer-Verlag, 1985.
- [16] Bridges E M. World Soils. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
- [17] Terjung W H, Louie S F. Energy input-output climates of the world: A preliminary attempt. *Theoretical & Applied Climatology*, 1972, 20(2): 129-166.
- [18] Tang Yongluan. Basis and demarcation of tropical and subtropical China in the view point of geo-flora. *Collection of Plant Ecology and Geo-flora*, 1964, 2(1): 135-143. [唐永鏊. 从地植物学的角度论划分中国亚热带和热带的依据及其界限问题. *植物生态与地植物学丛刊*, 1964, 2(1): 135-143.]
- [19] Yu Xianfang. Delineation of tropical boundary in China. *Tropical Geography*, 1981(4): 8-14. [余显芳. 关于我国热带界线的划分问题. *热带地理*, 1981(4): 8-14.]
- [20] He Dazhang, He Dong. North border of tropical climate of China. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(2): 176-182. [何大章, 何东. 我国热带气候的北界问题. *地理学报*, 1988, 43(2): 176-183.]
- [21] Zheng Du. System Research of Ecological Geographic Area in China. Beijing: The Commercial Press, 2008: 132. [郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008: 132.]
- [22] Tan Ruiwei, Zhang Shenglin. A study on the north boundary of the south subtropical zone in mid Guangdong. *Tropical Geography*, 1986, 6(3): 193-200. [谭瑞伟, 张声舜. 南亚热带北界广东中段分界的探讨. *热带地理*, 1986, 6(3): 193-200.]
- [23] Zhu Kezhen. Subtropical area of China. *Science Bulletin*, 1958, 8(17): 524-528. [竺可桢. 中国的亚热带. *科学通报*, 1958, 17: 524-528.]
- [24] Ren Mei'e. China's approximate tropical zone. *Journal of Nanjing University (Geography)*, 1962: 29-34. [任美鏊. 中国的准热带. *南京大学学报(地理学)*, 1962: 29-34.]
- [25] Ren Maie, Zeng Zhaoxuan. The extent of tropical zone in China. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, 11(2): 101-108, 97. [任美鏊, 曾昭璇. 论中国热带的范围. *地理科学*, 1991, 11(2): 101-108, 97.]
- [26] Hou Xueyu. Chinese Vegetation Geography. Beijing: Science Press, 1988: 183-185. [侯学煜. 中国植被地理. 北京: 科学出版社, 1988: 183-185.]
- [27] Zeng Zhaoxuan. China's tropical place. *Geographic Knowledge*, 1962(1): 12-14. [曾昭璇. 中国的热带地方. *地理知识*, 1962(1): 12-14.]
- [28] Zheng Du, Fu Xiaofeng. A preliminary study on issues of integrated geographical regionalization. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(3): 2-6. [郑度, 傅小锋. 关于综合地理区划若干问题的探讨. *地理科学*, 1999, 19(3): 2-6.]
- [29] Huang Bingwei. Study on tropical limitation of China: I. Definitions of tropical and subtropical in the world. *Scientia Geographica Sinica*, 1992, 12(2): 97-104. [黄秉维. 关于中国热带界线问题: I. 国际上热带和亚热带定义. *地理科学*, 1992, 12(2): 97-104.]
- [30] Zhong Gongfu, Huang Yuanlue, Liang Guozhao. Characteristics and regional diversity of tropical China. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(2): 245-252. [钟功甫, 黄远略, 梁国昭. 中国热带特征及其区域分异. *地理学报*, 1990, 45(2): 245-252.]
- [31] Zhang Baokun. Climatic Regionalization of China. Beijing: National Commission on Atlas Compilation, 1965: 197-201. [张宝堃. 中国气候区划. 北京: 国家地图集编纂委员会, 1965: 197-201.]
- [32] Chinese Academy of Sciences, Editorial Committee of "China's Physical Geography". China's Physical Geography (The Fascicule of Pandect). Beijing: Science Press, 1985: 187-197. [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理(总论分册). 北京: 科学出版社, 1985: 187-197.]
- [33] Qiu Baojian. The northern border of tropical zone in China. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 13(4): 297-306, 391. [丘宝剑. 关于中国热带的北界. *地理科学*, 1993, 13(4): 297-306, 391.]
- [34] Liu Peilin, Liu Chunla, Deng Yunyuan, et al. Landscape division of traditional settlement and effect elements of landscape gene in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1496-1506. [刘沛林, 刘春腊, 邓运员, 等. 中国传统聚落景观区划及景观基因识别要素研究. *地理学报*, 2010, 65(12): 1496-1506.]
- [35] Liu Weidong. Land type and comprehensive physical regionalization in Jiangnan Plain. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(1): 73-83. [刘卫东. 江汉平原土地类型与综合自然区划. *地理学报*, 1994, 49(1): 73-83.]
- [36] Ding Yuguo, Zhang Yaocun, Liu Jifeng. A new cluster method for climatic classification and compartment using the conjunction between CAST and REOF. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(1): 129-136. [丁裕国, 张耀存, 刘吉峰. 一种新的气候分型区划方法. *大气科学*, 2007, 31(1): 129-136.]
- [37] Miao Qilong, Li Zhaoyuan, Dou Yongzhe. Analysis of the major components of the climate and its demarcation in Shaanxi Province. *Geographical Research*, 1988, 7(2): 87-93. [缪启龙, 李兆之, 窦永哲. 陕西省气候的主成分分析与

- 区划. 地理研究, 1988, 7(2): 87-93.]
- [38] Cong Weiqing, Pan Mao, Li Tiefeng. Uncertainty reasoning and its application in the slope geological hazard zonation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(2): 891-302. [丛威青, 潘懋, 李铁锋. 不确定性推理及其在斜坡类地质灾害危险性区划中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 891-302.]
- [39] Huang Jiao, Gao Yang, Zhao Zhiqiang, et al. Comprehensive physiographic regionalization of China using GIS and SOFM neural network. *Geographical research*, 2011, 30(9): 1648-1659. [黄皎, 高阳, 赵志强, 等. 基于 GIS 与 SOFM 网络的中国综合自然区划. 地理研究, 2011, 30(9): 1648-1659.]
- [40] Chai Huixia, Zhou Chenghu, Chen Xi, et al. The new methodology of geomorphologic zonalization in Xinjiang based on geographical grid. *Geographical Research*, 2008, 27(3): 481-492. [柴慧霞, 周成虎, 陈曦, 等. 基于地理格网的新疆地貌区划方法与实践. 地理研究, 2008, 27(3): 481-492.]
- [41] Kuang Lehong, Liu Baochen, Yao Jingcheng. Research on regionalization of debris flow risk degree with fuzzy and extension method. *Journal of Catastrophology*, 2006(1): 68-72. [匡乐红, 刘宝琛, 姚京成. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究. 灾害学, 2006(1): 68-72.]
- [42] Li Shuangcheng, Xu Xuegong, Cai Yunlong. Method research and discipline development of physical geography. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2011(4): 399-406. [李双成, 许学工, 蔡运龙. 自然地理学方法研究与学科发展. 中国科学院院刊, 2011(4): 399-406.]
- [43] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Fan Jie, et al. Retrospect and prospect of regionalization system of China. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1538-1545. [吴绍洪, 尹云鹤, 樊杰, 等. 地域系统研究的开拓与发展. 地理研究, 2010, 29(9): 1538-1545.]
- [44] Wang Jinfeng, Li Xinhui, Christakos George, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [45] Liang Peng, Yang Xiaoping. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors. *Catena*, 2016, 145: 321-333.
- [46] Wu Rina, Zhang Jiquan, Bao Yuhai, et al. Geographical detector model for influencing factors of industrial sector carbon dioxide emissions in Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2016, 8(2): 149.
- [47] Li Xuewen, Xie Yunfeng, Wang Jinfeng, et al. Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in north China. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 63-69.
- [48] Wang Jinfeng, Hu Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [49] Liu Yansui, Yang Ren. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1011-1020. [刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理. 地理学报, 2012, 67(8): 1011-1020.]
- [50] Yang Ren, Liu Yansui, Long Hualou, et al. Spatial distribution characteristics and optimized reconstructing analysis of rural settlement in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 170-179. [杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析. 地理科学, 2016, 36(2): 170-179.]
- [51] Hu Yi, Wang Jinfeng, Li Xinhui, et al. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan earthquake, China. *PLOS ONE*, 2011, 6(6): e21427.
- [52] Luo Wei, Jaroslaw Jasiewicz, Tomasz Stepinski, et al. Spatial association between dissection density and environmental factors over the entire conterminous United States. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 692-700.
- [53] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [54] Wu Shaohong, Zheng Du. New recognition on boundary between tropical and subtropical zone in the middle section of eco-geographic system. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 689-697. [吴绍洪, 郑度. 生态地理区域系统的热带北界中段界线的新认识. 地理学报, 2000, 55(6): 689-697.]
- [55] Qiu Baojian. China's tropical, subtropical, and temperate. *Journal of Henan University (Natural Science Edition)*, 1993, 23(4): 11-12. [丘宝剑. 中国的热带、亚热带和温带. 河南大学学报(自然科学版), 1993, 23(4): 11-12.]
- [56] Xiong Yi, Li Qingkui. *China's Soil*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987: 15. [熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 2版. 北京: 科学出版社, 1987: 15.]
- [57] Wu Shaohong, Zhao Yan, Tang QiuHong, et al. Land surface pattern study under the framework of Future Earth. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 10-17. [吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究. 地

理科学进展, 2015, 34(1): 10-17.]

- [58] Wu Shaohong, Luo Yong, Wang Hao, et al. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(10): 1042-1054. [吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望. *科学通报*, 2016, 61(10): 1042-1054.]
- [59] Wu Shaohong, Liu Wenzheng, Pan Tao, et al. Amplitude and velocity of the shifts in the Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(19): 2187-2197. [吴绍洪, 刘文政, 潘韬, 等. 1960-2011 年中国陆地表层区域变动幅度与速率. *科学通报*, 2016, 61(19): 2187-2197.]

Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector

DONG Yuxiang^{1,2}, XU Qian¹, YANG Ren¹, XU Chengdong³, WANG Yuying¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation,

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China; 3. LREIS,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The northern border of the tropical zone of China has been the focus of studies on comprehensive physical regionalization. Based on different indexes and methods, the border was delineated by different scholars, but their results varied greatly. Based on the Geodetector model and regionalization thought of spatial stratified heterogeneity, the northern border of the tropical zone of China's mainland was investigated. Climatic elements were used as dominant demarcation partitioning indexes, combined with auxiliary indexes such as soil and multiple cropping types. The key results were as follows: (1) Using Geodetector, the northern border of the tropical zone was delineated. From west to east, the border goes through Lincang, Simao, Yuxi and Gejiu in Yunnan, Baise, Mashan, Guigang and Wuzhou in Guangxi, Zhaoqing, Guangzhou, Huizhou, Heyuan and Meizhou in Guangdong, and Zhangzhou, Quanzhou and Putian in Fujian. It generally agrees with the 12°C isotherm of the coldest monthly mean temperature, soil border between lateritic red soil and red soil, and border of double cropping rice or its continuous thermophile dry farming and single (double) cropping rice or its continuous chimonophilous dry farming. (2) The q average value of all indexes for the border was 0.40. Using this model, regionalization principles—homogeneity of the within-strata value and heterogeneity of the between-strata value—were satisfied. The border meets the requirements of zonal heterogeneity between tropical and subtropical zones. Therefore, it is reasonable to use Geodetector in studies of comprehensive physical regionalization, and it can provide high-precision technical support.

Keywords: Geodetector; the northern border of tropical zone; comprehensive physical regionalization; China