

# 中国中海拔地区冷凉型农业生态资源识别、开发与启示

胡舒云<sup>1,2</sup>, 陆玉麒<sup>1,2,3,4</sup>, 胡国建<sup>5</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 南京师范大学乡村振兴研究院, 南京 210023;  
3. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 5. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022)

**摘要:** 吃饱 and 吃好成为新形势下粮食安全的核心问题。通过明确冷凉地区概念及范围界定, 采用K-means聚类对中国中海拔冷凉区内43500个10 km精度的格网要素进行以农业生产为主导功能的空间识别和类型分区。结果显示: (1) 中海拔冷凉区面积约263万km<sup>2</sup>, 约占陆地国土总面积的28.47%, 主要集中分布于东北、西北和西南9省域的山地高原地形区; (2) 中海拔冷凉区可划分为以林为主山地湿冷区、以林为主高山温凉区、以农为主耕地旱凉区、以牧为主高原旱凉区、以牧为主高山高寒区五种农业发展类型; (3) 农林牧优势发展区域栅格面积占比分别为9.97%、34.21%和55.82%, 区县占比分别为27.34%、35.90%和36.76%。研究结果为探索特色农业布局与山区独特冷凉气候资源相结合提供科学依据, 对新时期保障粮食安全和实现乡村振兴战略具有重要实践意义。

**关键词:** 冷凉经济; 冷凉气候; 山区特色农业; 农业类型分区; 粮食安全观

农业革命奠定了人类文明的基础。“洪范八政, 食为政首”, 粮食安全是治国安邦和社会稳定之本, 古往今来概莫能外。1949年以后快速增长的人口迫使中国粮食产量被推至首要序位, 农业地理学长期围绕“温饱问题”, 开展了一系列区域农业资源优势发挥及粮食增产潜力与途径的研究<sup>[1,2]</sup>, 十八亿亩(1亩≈667 m<sup>2</sup>)耕地资源已基本保障居民生存与健康所需的温饱型主粮产品<sup>[3]</sup>。但不断变化的国际形势、重大公共卫生事件与粮食安全的“紧平衡”战略逻辑, 要求中国未来发展仍需围绕粮食供需双侧筑牢国家粮食安全防线<sup>[4]</sup>。尤其是, 随着生态健康要求提升和社会消费需求的转型, 居民对农产品的消费需求由“数量型”向“品质型”农产品转变, 农业生产的目标也从过去大宗农产品的数量保障目标转变为满足多层次需求的质量保障<sup>[5]</sup>, 从“吃得饱”转向“吃得好”是亟待破解的粮食结构性问题。在“以我为主、立足国内、确保产能、适度进口、科技支撑”的国家粮食安全战略下<sup>[6]</sup>, 中国农业发展需要从种质创新、作物单产、品质效益等方面, 确保元自然、高品质和富营养食物的可获性<sup>[7]</sup>。因此, 推动粮食生产向特色化和专业化方向发展, 是当前实现乡村振兴与保障粮食安全战略下粮食生产转型的战略选择<sup>[8,9]</sup>。

由于高原山地的异质性地面形态, 其相较于平原地区拥有更丰富的种质资源和气

收稿日期: 2023-07-09; 修订日期: 2023-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171171, 42171173); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX23\_1635)

作者简介: 胡舒云(1997-), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 研究方向为经济地理、农业地理。

E-mail: 15824981420@163.com

通讯作者: 陆玉麒(1963-), 男, 江苏张家港人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为空间结构与区域发展。

E-mail: luyuqi@263.net

候资源<sup>[10]</sup>。山地“冷”气候环境，在与更大平面尺度或垂直高度上的人类活动空间联系起来后，可转化为一种空间—时间序列上的宝贵农业资源，对农产品具有较大的提质作用<sup>[11,12]</sup>，对其进行可持续开发利用能够有效为实现食物品质特色提升提供保障<sup>[13]</sup>。如研究发现，芦笋的营养在根系中经冬季的低温转化，次年春天的芦笋就成为营养丰富的高档蔬菜<sup>[14]</sup>；南方茶叶主产区如果冬季气温比较低，来年春茶质量相对较高<sup>[12]</sup>；云南冷凉高地种植高山马铃薯的淀粉含量比平原马铃薯高出10%以上，茶叶中的茶多酚、咖啡因和芳香油含量更高，有更好的口感等<sup>[15]</sup>。因此，山区依靠其特色冷凉气候资源所提供的优质农副产品，相较于平原地区具有更高的作物品质和经济效益。但长期以来，气候冷凉、热量条件差、灾害性天气频繁被传统农业生产观念认为是农业发展的制约因素，大面积山区非耕地的冷凉气候资源一直未得到有效的重视以及开发利用，几乎90%以上的粮、棉、油、肉、奶、蛋都来源于仅占国土面积13.9%的平原耕地<sup>[12,15]</sup>。在国家新形势以内循环为主和生态文明战略背景下，农业开发已由传统的平面资源开发转向空间生态资源开发<sup>[13,16]</sup>，地理跨度所形成的垂直地带性分异使中国具备复杂多样的气候类型与地形特征，占国土面积近90%的高原山地的农业空间资源在广度与深度的开发上尚有相当潜力<sup>[12]</sup>。

综合目前对“冷凉气候”的研究，其定义为年均气温低于20℃，冬季漫长寒冷，夏季短暂冷凉、无霜期短、全年多风少雨干旱、昼夜温差大的地区，多出现在高纬度或高海拔地区。在该气候环境中的微生物、昆虫、动植物等特色生物群体所共同构成的生态环境为“冷凉生态”<sup>[12,17,18]</sup>。2011年，索亚林等<sup>[18]</sup>基于冷凉气候区别于传统气候的特点，提出冷凉气候也是资源的概念，认为中国大致形成一条从东北经过华北延伸到西北的宽阔、漫长的冷凉气候区域；2020年，屈冬玉研究员首次提出“冷凉经济”这一概念，指在冷凉气候的优势条件下由冷凉产业为核心衍生出的地方特色农业经济形态，并提出冷凉经济是中国西部农业结构调整、特色经济发展的一个重要方向<sup>[18]</sup>。目前来看，对于冷凉地区的研究较少，且主要是针对单独省市内部进行冷凉区界定及类型划分<sup>[19,20]</sup>，尚未有在全国尺度对冷凉区进行明确的概念和范围的界定以及以此为主要对象的农业类型划分与发展方向识别，缺乏对冷凉型特色农业气候资源条件下农畜作物品质的内涵解剖与深度挖潜。

为确保“饭碗牢牢端在自己手中”，且“主要装自己生产的粮食”<sup>[6]</sup>，本文以探索立足本土解决品质型农畜产品供给问题的有效途径作为切入点，构建品质型特色农业开发利用的内在逻辑（图1），通过明确冷凉区相关概念及界定，从地貌、温度、热量、降水方面选取8个指标进行空间叠置分析，在全国尺度筛选符合冷凉气候条件的栅格区域。

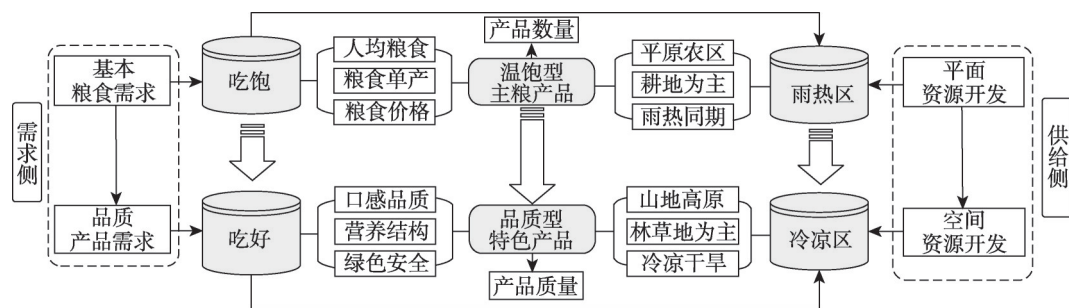


图1 品质型特色农业开发利用内在逻辑

Fig. 1 The inner logic of specialty quality agriculture development and utilization

从发生学角度在自然环境方面选取 20 个指标对冷凉区进行以农业生产为主导功能的空间识别和类型划分,并在此基础上提出相应的农业发展方向和发展途径,以期为因地制宜开发利用冷凉区优势农业气候资源提供科学依据,将低温干旱的资源劣势转化为特色农业生产的气候优势,推动特色农业布局 and 品质型作物配置与中国山区独特冷凉气候资源相结合,破解落后地区农业产值低下和农畜产品竞争弱势困境。

1 冷凉区特色农产品及其形成原因

1.1 冷凉环境下农作物特征及优势

通过查阅整合现有研究<sup>[14,17,20-22]</sup>及相关农业与气候区划<sup>[23-25]</sup>、作物种植区划<sup>[26,27]</sup>资料,列举部分农、林、牧农作物在冷凉地区与其他地区的对比数据以及在不同海拔高度、气候条件下作物品质的差异情况,对冷凉型气候环境条件下农产品特征及其优势进行总结(表 1~表 3)。(1) 水稻:研究表明,黑龙江五常市稻米垩白度(%)、直链淀粉(占干

表 1 不同地区与气候条件下大宗农产品特性对比

Table 1 Comparison of bulk agricultural products in different regions and climatic conditions

地区	9~10月上旬 降水量/mm	气温日 较差/℃	大豆		甜菜、棉花	地区	小麦				
			蛋白质 含量/%	含油 率/%			绒长 /mm	衣分 /%	抽穗至成熟 期均温/℃	蛋白质 含量/%	淀粉 含量/%
东北地区	73.3	11.3	40.7	21.2	15.1、17.3	西北内陆	31.06	37.11	14.0	13.0以上	52.0
黄淮地区	44.2	13.3	44.3	19.8	7.5	黄河流域	29.15	34.97	16.5	10.6	55.4
南方地区	37.8	24.1	45.7	18.4	6.5	长江流域	30.32	36.10	21.8	8.4	56.9

表 2 不同海拔高度下蔬菜及瓜果成分对比

Table 2 Comparison of vegetable and fruit crop quality under different altitude conditions

海拔高度/mm	a. 不同海拔离苣内灰分和矿物元素含量（占干重%）					
	灰分	钙	镁	钾	钠	磷
500	7.0	0.32	0.16	2.15	0.00	0.22
1200	24.28	1.42	0.60	7.06	0.28	0.43
海拔高度/mm	b. 不同海拔散叶甘蓝的茎部化学成分（占湿重%）					
	干物质/%	总糖量/%	粗蛋白质（Nx6.25）/%		抗坏血酸/(mg/100 g)	
1300	14.6	4.7	2.5		54.6	
2700	18.2	7.0	3.0		59.5	
海拔高度/mm	c. 山地和山前地带的番茄果实化学成分					
	糖（占干重%）			抗坏直酸/(mg/100 g 湿重%)		
	青熟期	黄熟期	成熟期	青熟期	黄熟期	成熟期
674	46.6	52.0	70.3	15.8	18.9	21.4
1529	62.9	75.5	77.7	26.3	29.9	31.9
海拔高度/mm	d. 不同海拔“美乐”葡萄化学成分					
	总酚/(mg·g <sup>-1</sup> )	可溶性固物/%	还原糖/(g·L <sup>-1</sup> )	蛋白质/(mg·g)	pH	总酸/(g·L <sup>-1</sup> )
41	4.54	17.50	276.85	1.01	4.03	8.64
2343	8.31	25.18	319.01	1.40	4.30	7.63
海拔高度/mm	e. 不同海拔苹果果实外观与成分含量					
	果实硬度 /(kg·cm <sup>-2</sup> )	可溶性糖/%	维生素C /(mg·hg <sup>-1</sup> )	色泽总量 /(La·b <sup>-1</sup> )	糖酸比	可滴定酸/%
1340	8.82c	8.83c	4.66d	89.67bB	29.01b	0.30c
1980	10.98a	10.07bc	8.13a	135.49aA	20.87d	0.48a

注:同行不同小写字母表示同一品种不同试验点差异显著(P<0.05);同列不同大写字母表示同一试验点不同品种差异显著(P<0.05)。

表3 冷凉地区与平原地区畜产品营养成分对比

Table 3 Comparison of the quality of livestock products in cold and cool regions and plain areas

营养成分	a. 内蒙古羊肉（苏尼特羊）与其他地区（小尾寒羊）营养成分比较		
	内蒙古地区	其他地区	提高/%
蛋白质/%	20.76	17.11	+21.33
粗蛋白质/%	20.05	17.26	+16.16
脂肪/%	8.05	4.705	+71.09
粗脂肪/%	3.13	4.15	-24.58
胆固醇/(mg·kg <sup>-1</sup> )	102.00	142.00	-28.17
含水量/%	70.63	75.31	-6.21

营养成分	b. 内蒙古地区（乌兰察布）与中原地区牛奶营养成分的比较（每100 ml）		
	内蒙古地区	中原地区	提高/%
年产量/T	1.00	6.50	-85.00
能量/KJ	56.80	54.00	+5.00
蛋白质/g	4.00	3.10	+29.00
脂肪/g	5.00	3.40	+47.00
干物质/%	15.00	11.00	+36.00
碳水化合物/m	4.80	3.40	+41.00
钠/mg	62.00	37.20	+67.00
钙/mg	109.00	104.00	+5.00

重%)与粗蛋白质含量(%)、胶稠度(mm)等指标均高于全国平均水平,其专业品质适合加工干米粉和制作豆腐使用<sup>[25]</sup>。(2)小麦:在气温较低且大陆性强的环境下,春小麦抽穗到成熟的时间比平原地区大约多10日左右,充分的物质积累使得干粒重较平原地区高出4~5 g,且干旱气候更有利于土壤中氮素的积累和小麦籽粒蛋白质的形成<sup>[12,28]</sup>。北方南温带地区高山小麦的蛋白质含量比长江流域和华南地区的平原小麦高出10%~15%,因此南方以种植淀粉用小麦为主,北方冷凉地区种植蛋白质高的优质小麦更有优势。(3)大豆:研究表明大豆在22℃、25℃、29℃三种温度条件下含油率分别为22.3%、20.8%、19.5%,含油率随温度升高而降低,蛋白质含量随温度升高而增加<sup>[29,30]</sup>。因此,南方地区适宜生产食用性大豆,冷凉地区生产油用大豆具有较高经济价值。(4)甜菜:甜菜原产较冷凉地区,主要在高纬度种植,其含糖率与气温和降水关系密切,日照时数与日较差大且降水少的地区使得甜菜的糖分积累更加充分。内蒙古、西北冷凉地区含糖量可达13%~15%,而江淮地区不到7%<sup>[12]</sup>。(5)棉花:西北内陆棉区气候干燥少雨,昼夜温差大,棉绒长度长,纤维含糖量较高,较长江流域和黄河流域棉花具有其独特优势<sup>[12]</sup>。

根据莴苣、甘蓝、番茄在不同海拔高度种植的作物营养成分差异可知,冷凉地区蔬菜的干物质相对提高40%以上,含糖量和维生素含量均平均提高2倍以上(表2a、表2b、表2c)<sup>[14,17]</sup>;高海拔产区的葡萄浆果积累更多的氨基酸、有机酸、醇、多酚、糖类等物质<sup>[31]</sup>,浆果总酚、可溶性固形物含量显著高于低海拔区葡萄园(表2d)。且低温环境更有利于蔬果的储存和延迟采收,能增强抗性更好地适应气候变化;黄土高原高海拔地区可溶性糖含量比平原地区种植的苹果高出15%以上(表2e),其着色度(着色面积与果面积之比)也较亚热带地区更高,果实硬度、口味更加优良<sup>[32]</sup>,具有发展特色蔬果产



业的作物优势。

研究数据显示,内蒙古苏尼特羊羊肉的脂肪含量比中原及南方等地区羊肉的脂肪含量更高,蛋白质相对提高了20%(表3a);乌兰察布地区的荷斯坦奶牛的牛奶虽然产量仅是中原地区的40%~50%,但是其干物质含量却比中原地区牛奶高36.36%,蛋白质含量高29%,脂肪含量高47%<sup>[14,17]</sup>(表3b);甘肃天祝白牦牛肉球蛋白比例、胡萝卜素含量、热能值均数倍高于普通牛肉,脂肪含量较其他牛肉低3%~8%,且肉内含有大量的钙、磷等矿物质,多种微量元素和氨基酸,对增强人体抗病力、细胞活力及器官功能均有显著作用<sup>[20]</sup>。冷凉地区的畜产品无论是在奶质、肉质口感等方面都比中国中原和南方等其他地区的同类产品表现优良,因此其潜在价值显然不能以重量作为交换单位。

## 1.2 冷凉环境下特色农业形成原因

长期冷凉的自然环境塑造了独特的土质结构和冷凉生物群,高海拔地区土壤以富含钾、钙等矿物质的沙质土为主,其速效钾含量在180~200 ppm之间,是中原地区的2~3倍<sup>[17]</sup>,自然植被以荒漠化、半荒漠化的草本植物和灌木为主体,含有更多干物质、矿物质和辛香类、生物碱类物质<sup>[12,17]</sup>。由于冷凉环境下蒸发量多倍于降水量,空气湿度低,植物蒸腾量大且根系发达,作物从深层土壤中吸收的水分和矿物质总量显著高于其他地区。低温使植物的呼吸作用减弱,消耗减少,利于蛋白质等有机质的积累<sup>①</sup>,为抵御低温细胞内可溶性糖和脂肪的含量也将增加。除此之外,冷凉区优质短波光光照能量较中原和南方地区高10%~15%,全年太阳总辐射量在150~160 kcal,有效光照时间达3000 h左右<sup>[15]</sup>,风量多且风速大。加之山地独特的区位立体优势提高了作物光合作用效率,综合影响表现在提高农作物糖分、蛋白质和维生素、光合色素(如叶绿素等)含量。

在区域农业特征方面,冷凉地区以一年一熟制的旱作农业为主体,有利于土壤恢复保持良性状态,对作物优良品质的形成具有可持续性。冷凉气候环境下细菌繁殖速度降低2~3倍,病菌浸染的菌源量减少3~5倍,越冬基数减少2倍以上<sup>[15]</sup>,抑制了农业病源生物的发生、发展和蔓延,较之中原及南方两季或三季农作区农业病虫害积累程度轻微。此外,由于冷凉地区地域辽阔多山地,人口密度小,农耕开发历史较短,较之中原及南方地区工业化与城市化程度相对更低,极大地减少了土壤、灌溉水源及空气中的有害物质。同时,北方高纬度地区的天然草原畜牧业区域和农牧交错地区农家肥等有机肥源避免了过量使用化肥造成的农药污染,是农业生产中少有的“净土”。因此冷凉资源也是安全资源,尤其适合发展高附加值的有机特色农业产业(图2)。

## 2 冷凉区范围界定依据及空间分布格局

### 2.1 冷凉区地理范围界定依据

气候分类方法大致有两类:一是以气候要素指标为依据的结果分类法,按自然地理因素的空间分布状况,对照气温和降水的分布特征及其不同组合将气候分为不同类型,主要以柯本气候分类为代表<sup>[33]</sup>。二是以气候形成原因作为主要依据的过程分类法,以阿里索夫斯查勒的气团分类法为代表<sup>[34]</sup>。综合现有研究,冷凉气候多产生于高海拔或高纬度地区,因而具有相似的气候条件,目前界定依据多为海拔、纬度和温度指标<sup>[17,18,32,35-37]</sup>,

<sup>①</sup> 实验证明,植物经低温诱导能活化某些特定基因并经转录翻译合成一组新蛋白,例如拟南芥、首稽、油菜、菠菜等经低温诱导后均有不同程度新的胁迫因子合成,称之为冷调节蛋白<sup>[17]</sup>。

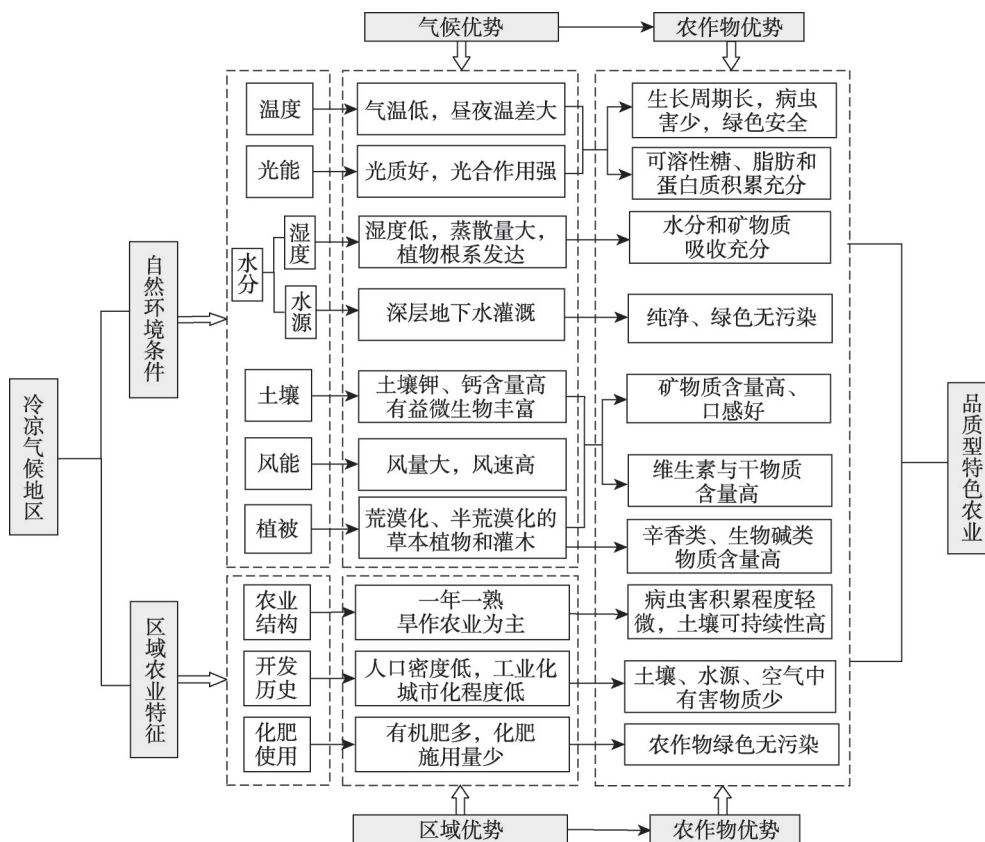


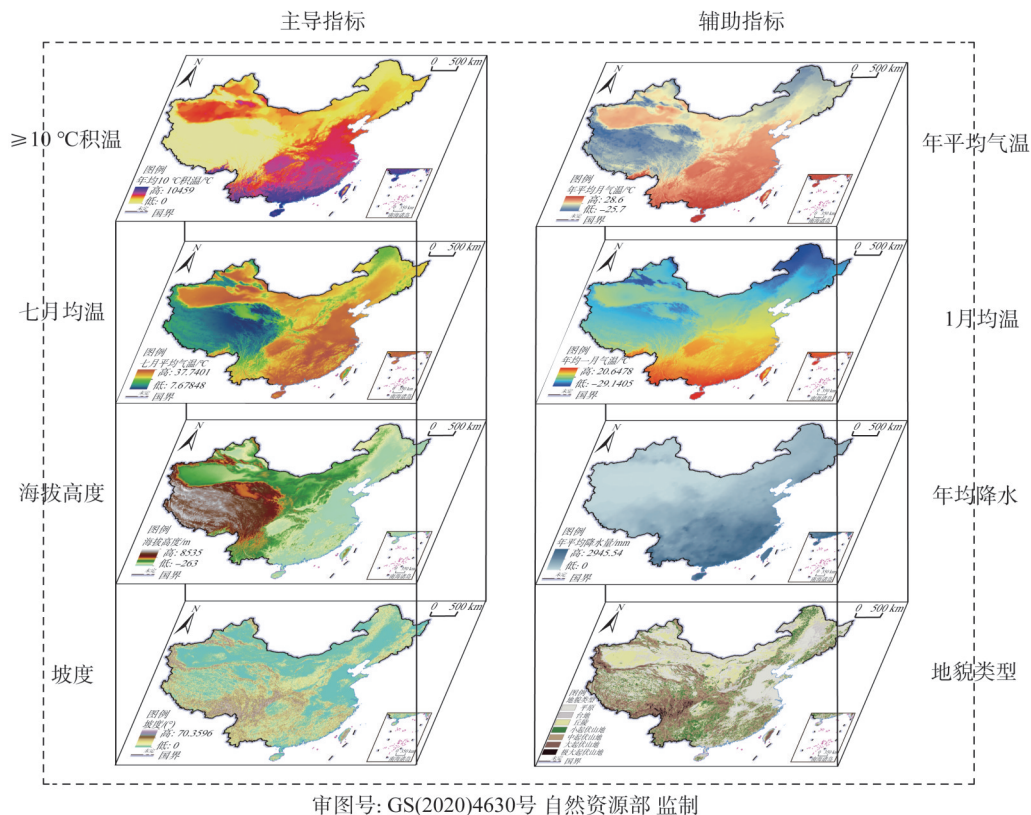
图2 冷凉地区特色农业形成原因

Fig. 2 Reasons for the formation of quality-based specialty agriculture in cold and cool regions

但因其横跨多个温度带，垂直地带分异与水平变化共同作用下使得区域内部农业气候条件极为复杂。通过查阅整合现有研究以及相关气候区划资料，依据区域内部气候相似性与区域之间差异性，遵循区域划分的综合性和主导因素相结合的原则，综合地貌（海拔、地形）、2010—2020年间的温度、热量、降水四方面8个指标进行图层要素空间叠置分析（图3），在全国范围内采用结果分类法对冷凉气候区范围进行重新界定。

凉、温、温凉、温热、热、炎热等是根据最热月平均气温的高低进行的气候划分<sup>[22]</sup>，最热月平均气温的地理分布能较为综合地表现出非地带性因素对气候的影响，最冷月气温决定着地带性植物的生长与越冬，根据农业界限温度的物候指标与喜凉耐寒蔬菜对温度条件的要求<sup>[25]</sup>，多数作物适宜生长的温度上限为25℃，最冷月不低于10℃<sup>[27]</sup>。在海拔高度方面，由于不同温度带山地各高度热量条件不同，中国北方农业生产主要集中在海拔2000 m以下，南方亚热带山区海拔3000 m仍可种植耐寒作物<sup>[38]</sup>。根据《中华人民共和国地貌图集（1：100万）》的海拔高度分级<sup>②</sup>，综合考虑农作物种植的热量与太阳辐射以及土地利用的方式和强度，选取600~3000 m海拔高度范围内的区域为研究对象，不包括农业发展基础较好的平原地区。由于中国高纬度地区常年气候冷凉，参考已

② 中国山地海拔分为4级，低海拔（<1000 m）、中海拔（1000~3500 m）、高海拔（3500~5000 m）、极高海拔（>5000 m）<sup>[39]</sup>。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图3 指标要素空间叠置分析

Fig. 3 Spatial superposition analysis of index elements

有研究<sup>[17,18]</sup>, 将40°N以上地区海拔高度下限设置为200 m。在热量指标方面, 按 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温可划分为 $\geq 6000^{\circ}\text{C}$ 、 $5000\sim 6000^{\circ}\text{C}$ 、 $4000\sim 5000^{\circ}\text{C}$ 和 $< 4000^{\circ}\text{C}$  4个等级, 即暖热区、温热区、温暖区和温凉区<sup>[38]</sup>。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温在 $4000^{\circ}\text{C}$ 以内地区以一年一熟的喜温喜凉作物为主<sup>[25]</sup>, 考虑到南亚热带 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温在 $4500^{\circ}\text{C}$ 范围内也适宜种植冷凉作物<sup>[40]</sup>, 因此确定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的上限为 $4500^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 冷凉区空间分布及区域占比

综合前述分析, 采用海拔高度、坡度、最热月平均气温、日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 期间的积温作为主导指标, 最冷月平均气温 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 、多年平均气温 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ 以及多年平均降水量 $\leq 2000\text{ mm}$ 作为辅助指标。以中国1:100万地貌类型分类为标准, 将8类指标的栅格图进行套叠选取重合栅格为符合条件的区域作为冷凉区(图4)。由于冷凉栅格区域并不严格与行政边界一致, 为保证行政区连续性与完整性, 将冷凉区与全国区县数据相交(图4b), 按栅格所在地区占比30%以上的区县进行统计(图4c), 范围基本与冷凉区栅格范围一致(图4a)。由于本文研究对象仅为3000 m海拔高度范围内的地区, 因此青藏高原地区虽具有冷凉气候优势但因海拔过高不列入研究区范围内。

结果显示, 中国中海拔冷凉区面积约263万 $\text{km}^2$ , 占陆地国土总面积的28.47%, 范围大致从东北、西北至华北一直延伸到西南地区, 在地势上与第二阶梯较为重合, 大致



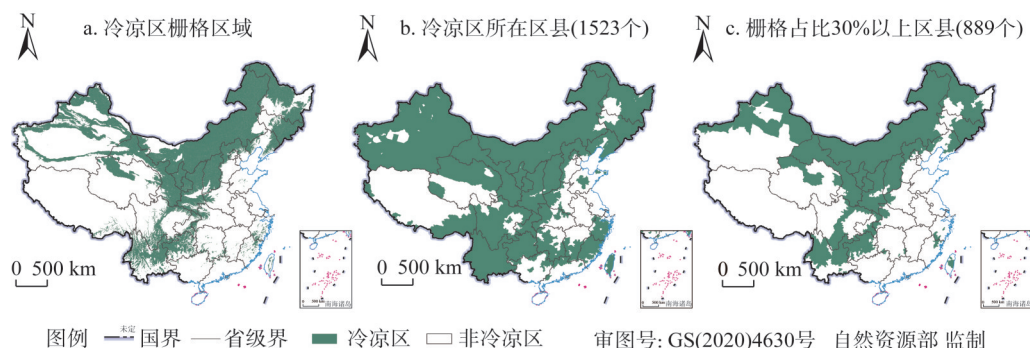


图4 中国冷凉区空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cold and cool regions in China

位于祁连山、横断山脉之东，大兴安岭、太行山脉、巫山、雪峰山以西，昆仑山脉以北。主要分布于23省（自治区、直辖市），164市（盟、自治州），889县（区、旗）。区域内主要有内蒙古高原、鄂尔多斯高原、云贵高原，大陆性气候特征明显，主要表现为气温低、光照充足、风速大且风量多，湿度低，降水少，气候干旱，大部分冷凉优势地区昼夜温差在 $10^{\circ}\text{C}$ 以上，有效积温 $1900\sim 4000^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 $90\sim 120$ 天，冬季最低温在 $-10\sim -15^{\circ}\text{C}$ 之间。农作物以喜凉作物为主，部分地区可种植喜温作物。通过计算省、市、县三级区域冷凉区域栅格面积，高占比冷凉优势区集中分布于9省（自治区），分别位于东北（黑、吉）、西北（晋、陕、甘、宁、内蒙古）、西南（云、贵），其中以西北5省（自治区）占比最高（图5），区域划分结果与目前相关研究基本一致。

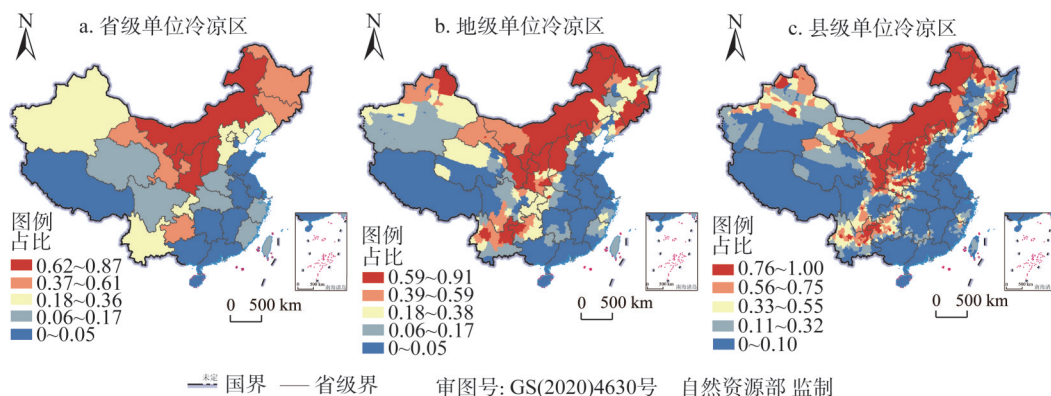


图5 中国省、市、县内冷凉区域占比

Fig. 5 China's provincial-level regions, prefecture-level cities and counties with proportions of cold and cool regions

### 3 冷凉区农业类型及发展方向

#### 3.1 指标体系构建与方法

冷凉区自北向南依次经历北温带、中温带、南温带和北亚热带、中亚热带的垂直分布，区域内地势高拔，地形复杂，垂直地带分异与水平地带差异叠加使得这一区域的农业自然条件极为复杂。自然地理环境反映区域自然特性和农业自然资源供给能力，是分



区形成和分异的基础。由于冷凉型气候资源的优劣和气候生产力的高低受到地形、温度、光照、湿度、风量、土壤、水的多种自然要素影响，冷凉区内自然环境系统结构的差异必将导致农业生产结构和农业发展类型的差异。为挖掘冷凉地区农业生产潜力，利用冷凉型气候资源扬长避短地指导农业生产，借鉴已有研究<sup>[41-43]</sup>，对冷凉区按照一定的自然环境指标进行农业地域类型划分（表4）。在符合区域农业现状条件的基础上识别区域内部农业类型特征与分布范围。本文气象数据的均值均采用2010—2020年间数据。

表4 冷凉区农业类型分区指标体系

Table 4 Index system of agricultural type zoning in cold and cool regions

指标特征	分区指标	数据来源	指标选取依据	权重/%
地形	地形起伏度	计算方法见封志明等 <sup>[44]</sup>	反映地方尺度自然地理综合体的形态特征	8.71
	坡度	根据DEM数据计算得到	决定农业土地利用方式和强度	8.55
	海拔高度	SRTM（Shuttle Radar Topography Mission, SRTM）	造成农业生产明显垂直差异，决定作物、林木种类分布界限	3.95
水资源	年均干燥度	中国科学院资源环境数据中心（ <a href="https://www.resdc.cn/Default.aspx">https://www.resdc.cn/Default.aspx</a> ），中国气象背景数据 <sup>[45]</sup>	综合反映年降雨量与年蒸发量	10.33
	年均湿润指数		干燥度的倒数，衡量地区湿润度	1.49
	年均降水量		反映地区水分条件	6.33
风力资源	年均风速	中国气象背景数据 <sup>[45]</sup>	影响地区栽培措施、品种选择	1.29
光热资源	年均 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温	中国气象背景数据 <sup>[45]</sup>	植物、作物生长发育重要因素	1.64
	年均日照时数		与糖、蛋白质等有效物质含量相关	1.46
	年均7月昼夜温差	Zendo网站开放获取		2.61
	年均1月昼夜温差			2.67
	年均温	计算方法见徐新良 <sup>[45]</sup>	自然环境温度决定作物类型及布局	1.23
	最热月（7月）均温	WorldClim网站开放获取		1.13
	最冷月（1月）均温	（ <a href="https://www.worldclim.org/">https://www.worldclim.org/</a> ）		3.05
植被资源	植被光温生产潜力	中国科学院空天信息创新研究院，全球植被光温生产潜力数据集（2015—2020年）（ <a href="http://www.aircas.cas.cn/">http://www.aircas.cas.cn/</a> ）	反映土壤类型、结构组成、肥力和盐碱化程度等	0.83
	植被净初级生产力NPP	LP DAAC-MOD17A3HG5	表征光合作用强度	1.30
土地资源	草地覆被占比	国家青藏高原科学数据中	决定地区农业发展类型	7.68
	农田覆被占比	心，中国土地覆被占比数		19.94
	林地覆被占比	据集（2001—2018年）（ <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a> ）		15.81

冷凉区内部农业类型分类采用基于欧氏距离的K-means聚类算法，这一自下而上的聚类方法可以较好地克服多元统计分析中变量之间的相关关系问题而被广泛应用<sup>[42,46]</sup>。首先将1 km精度的栅格要素指标汇总至10 km精度的渔网网格进行空间尺度统一，再对原始数据进行极差标准化处理，并综合运用熵值法和德尔菲法计算每个图层指标的权重（表4），将标准化值乘以对应权重后得到的新的指标值作为聚类分析的初始值。聚类的具体过程为：首先设定冷凉区农业类型为k类，随机选取k个栅格单元作为初始聚类类别

的中心，将剩余栅格单元分配至距离最近的类别中，得到  $k$  个类型簇  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ ，取每个簇中所有栅格单元的均值作为新的聚类中心。反复迭代以上聚类过程至类中心不再发生变化时停止，并生成最终的类型分组。聚类的公式如下<sup>[42]</sup>：

$$\min J(C) = \sum_{x_i \in X} w \times d^2[x_i, C(x_i)], \quad C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\} \quad (1)$$

式中： $J(C)$  为各类型簇内格网单元到其类中心的距离平方和； $x_i$  为第  $i$  个格网单元； $C(x_i)$  为类别  $C$  的中心； $w$  为要素权重； $d$  表示两个数据点之间的欧氏距离。为评估最佳组数  $k$  的参数值，本文运用 Calinski-Harabasz (CH) 伪  $F$  统计量测试不同分组方式的组内相似性和组间差异性。伪  $F$  统计量值越大代表着类组内联系越紧密，组间距离越分散，即更优的聚类结果。伪  $F$  统计量计算公式为<sup>[46]</sup>：

$$F = \left( \frac{R^2}{n_c - 1} \right) / \left( \frac{1 - R^2}{n - n_c} \right) \quad (2)$$

$$R^2 = (SST - SSE) / SST$$

式中： $R^2$  是衡量回归模型对数据拟合程度的指标，表示模型解释的方差比例； $n$  表示样本单元数目（个）； $n_c$  表示类数目（个）； $SST$  为组间差异性统计量； $SSE$  为组内相似性统计量，经过多次实验，选取的  $k$  值为 5 时伪  $F$  统计量最高，分类结果较为可信。

### 3.2 冷凉区各分区农业发展类型

为更好地挖掘和利用冷凉地区空间生态资源，探究冷凉优势地区空间指向与区域特色农业发展差异，分类分区依据定性分析与定量研究相结合原则、生产性原则与实用性原则，简明阐述冷凉区农业发展类型。总体来看，中海拔冷凉区优势农牧林业面积占比分别为 9.97%、55.82% 和 34.21%，牧业区域面积最大，农业最少；根据栅格面积占比 30% 以上的冷凉优势区域内的区县数量统计，可发展品质型农林牧业的区县比例较为平均，分别为 27.34%、35.90% 和 36.76%（图 6）。依据五种类型农业自然环境指标和土地覆被占比的差异化均值（表 5），冷凉地区可划分为五种农业发展类型，具体为：

（1）以林为主山地湿冷区（I）：位于中温带湿润半湿润区，集中分布在黑龙江省中部和东南部、吉林省和辽宁省东部广大山地，以大小兴安岭和长白山为主体，包括张广才岭、老爷岭、完达山、哈达岭和辽东半岛境内长白山支脉千山山脉，河北北部以及山西和陕西部分地区也有少量分布。区域年湿润指数在 0.5~1.0 之间，宜农荒地面积较大，具有珍贵的野生动植物资源，中药材种类多且藏量大，可依托丰富的林下资源优势种植特色林业作物和果品经济林，建设“北药”产业基地。

（2）以林为主高山温凉区（II）：位于中亚热带属东南季风湿润山地气候，主要分布在西南云贵高原、闽浙丘陵、秦岭等地。区内天然草地面积较多但多以零星分散的草山草坡为主，利用难度较大，农业发展主要以林业为主。在地带性和非地带性因素的作用下，复杂的生物群落组合为发展农业生产提供了重要资源条件，经济林木、林草中药材种植以及生态健康果蔬产业具有较大特色优势和潜力，适宜农林果药并举。

（3）以农为主耕地旱凉区（III）：位于暖温带和中温带，是冷凉区中面积占比较小但分布零散且广泛的旱作种植业区域。分布在黑龙江和吉林中部，山西中部和陇东南，少量分散于贵州中部和新疆地区，河西走廊、河套平原和宁夏平原是其中三个主要灌溉农业区。

（4）以牧为主高原旱冷区（IV）：位于干旱中温带，以草甸草原、典型草原为主的畜牧业发展类型，分布在内蒙古、宁夏与甘肃、陕西、山西北部、冀北高原、新疆天山以

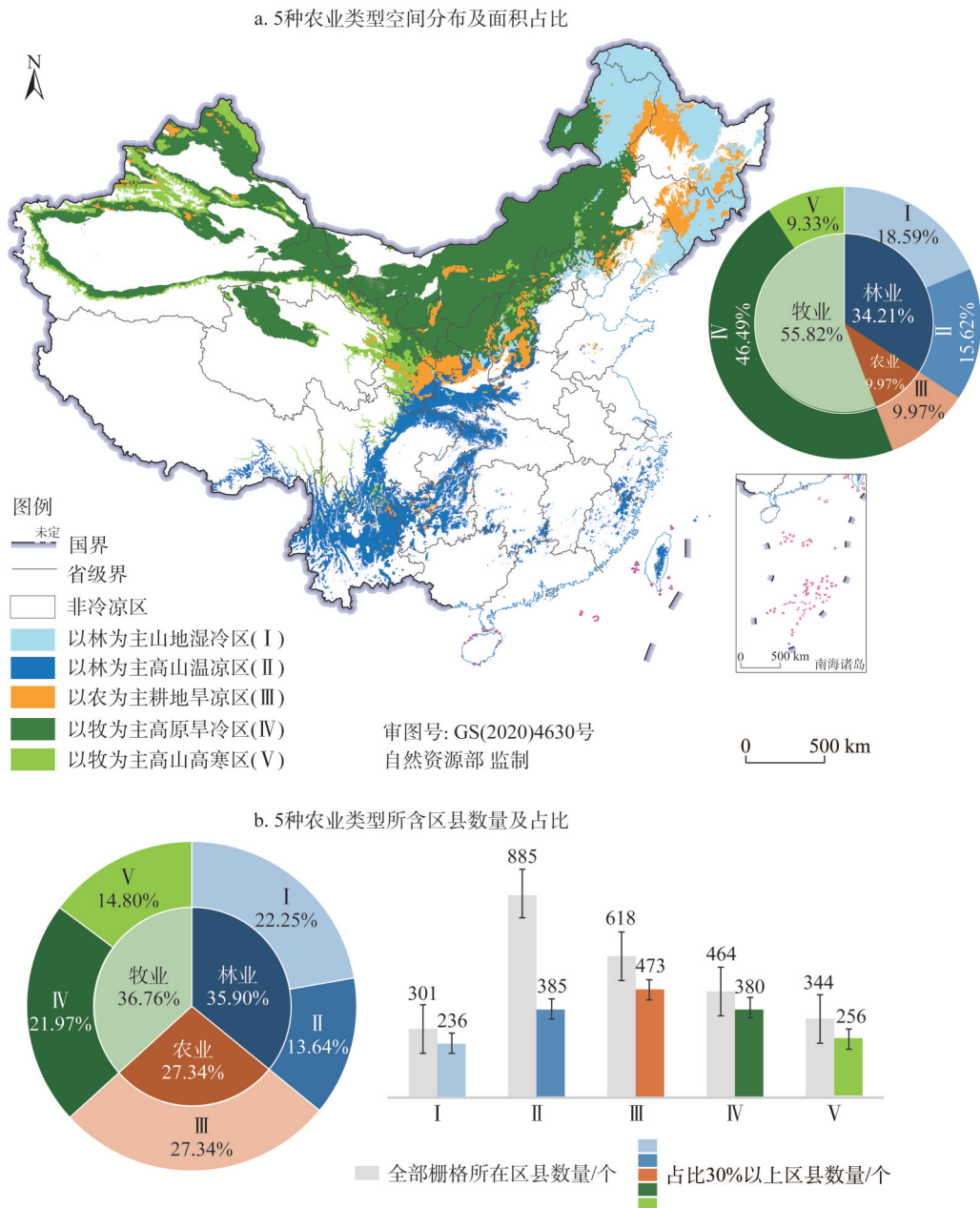


图6 中国冷凉区农业类型及各类占比

Fig. 6 Types of agriculture and the percentage of each type in the cold and cool regions of China

南以北的山地，由农牧交错过渡到以牧为主。该区土地资源与光热资源丰富，夏、秋季可形成水草丰美的天然草场。区内年降水量由东向西逐渐减少，至西北内陆沙漠在100 mm 以下，夏温较高，日较差大。应把牛奶、羊绒、牛羊肉特色农畜产品及其加工业，草业和特色种养业作为农业发展的重点。

(5) 以牧为主高山高寒区 (V)：面积在五种类型区中占比最少，主要位于与青藏高原接壤的甘肃西南部，青海部分地区以及新疆天山山脉及准噶尔西部山区。高海拔山地

表5 五种农业类型区指标均值  
Table 5 Average values of indicators for the five agricultural type zones

指标	I	II	III	IV	V
10℃积温/℃	2008.90	3657.35	2836.83	2583.67	1312.01
0℃积温/℃	2400.70	4351.71	3218.70	2994.48	1947.18
夏季昼夜温差/℃	10.73	9.04	15.25	25.43	19.30
冬季昼夜温差/℃	6.19	6.80	9.56	12.35	10.01
日照时间/h	2886.00	1894.55	2740.82	2985.51	2707.77
干燥度	0.88	0.89	1.36	5.00	4.94
海拔高度/m	627.27	1623.38	699.19	1340.67	2641.98
年平均气温/℃	0.24	11.77	5.47	4.69	1.13
年均降水/mm	573.12	1069.90	530.84	228.12	329.51
湿润度	10.34	38.44	-5.33	-37.84	-20.63
最热月均温/℃	22.61	23.28	25.04	24.47	17.18
最冷月均温/℃	-20.26	3.83	-11.80	-12.58	-13.28
光温生产潜力	55.75	80.69	68.77	76.87	45.96
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	2.47	2.39	2.40	2.88	2.89
坡度/(°)	6.52	15.49	3.91	2.88	15.32
地形起伏度/(°)	87.11	209.53	53.50	39.07	211.24
草地覆被占比/%	0.29	0.28	0.16	0.47	0.64
林地覆被占比/%	0.63	0.59	0.09	0.03	0.14
耕地覆被占比/%	0.07	0.10	0.72	0.07	0.07

气候严寒，降水稀少，最热月平均气温≤18℃，气温和热量资源垂直变化明显。由于区域降水稀少，未利用土地较多，终年呈荒漠、半荒漠景观，脆弱的生态环境仅支持发展畜牧业。

3.3 冷凉区各分区品质型农业发展方向

基于冷凉区内部区域农业发展类型的差异，通过查阅现有栽培作物分布区域、界限及作物生长发育和产量形成的农业气候指标资料<sup>[14,15,23-27]</sup>，根据区域内部光、热、水等自然要素组合状况的差异，将产量、产品品质与当地气候结合考虑，挖掘农业发展类型内部区域分异特征，确定不同的名、优、特、稀农林作物的开发利用优势区，指明区域特色农业发展方向。冷凉区农业开发的重点应以发展品质农林作物和优质畜种为代表的具有区域特色的高质量农业产品结构体系。在农林种植业方面，冷凉气候资源利用应重视分层次综合开发，较高海拔高原山地种植生育期短、耐寒喜凉作物，中低海拔山麓宽坦河谷和平川以中晚熟作物为主。利用冷凉气候资源建立夏秋农作物基地，发展耐（喜）低温蔬果和杂粮、特种皮毛类动物养殖培育等作为“反季”“错季”农副产品，以实现全国范围的优质农产品供给互补，提高经济效益。畜牧业发展要改革传统的养殖方式，以舍饲圈养、秸秆养牛提高畜产品商品率，提高优质肉牛、肉羊比例以调整和改良畜群结构与畜群品种，将草原牧区打造成为优质冷凉家畜繁育带。具体分区特征及其农业发展方向归纳如下（表6）。



表6 中海拔冷凉区农业类型及特色发展方向

Table 6 Agricultural characteristics and special development direction of the cold and cool regions at middle altitudes				
农业类型	类型区	包含区域	品质作物/畜种/畜产品	品质农业类型
林业	I 以林为主山地湿冷区	大小兴安岭、长白山区	人参、鹿茸、天麻、灵芝	药用植物
			山葡萄、黑加仑、榛子、山核桃、曹菇、木耳、柞蚕	果品经济林、林特作物
			兴安落叶松、红松、樟子松林、桦树、杨树	用材林
		冀北、陕中、山西部分地区	板栗、山楂、柿子、沙棘	果品经济林
			香椿、黄连木、翅果油树、皂荚	特色树种
			金银花、酸枣	林下中药材
	II 以林为主高山温凉区	陕南、豫西、鄂西、甘南、晋南部分地区	黄连、党参、天麻、杜仲、当归、茜草、枝子、元胡、贝母、魔芋、茯苓、细辛	中药材
			甜菜、西瓜、苹果、猕猴桃、板栗、杏、柿	干鲜瓜果
		滇、贵、渝东南、四川盆地周边山脉所在地区	沙棘、烤烟、桑蚕、茶叶、花卉	林特作物
			三七、山楂	中药材
			苹果、梨、龙眼、荔枝、芭蕉、香蕉	果树
种植业	III 以农为主耕地旱凉区		油茶、核桃、澳洲坚果	坚果、含油果
			漆树、松树、杉树、茶树、毛竹、油桐	经济林木
		三江平原西、长白山、辽西北	春小麦、春大豆、甜菜、玉米、水稻、曹菇、木耳、柞蚕	商品粮豆基地
		河西走廊、河套平原、宁夏平原以及甘南、陕中、山西部分地区	水稻、玉米、高粱及小麦、谷子豆类、薯类等、糖用甜菜	旱作杂粮、糖料
			枣、猕猴桃、黄花草、黑瓜籽、甜瓜、啤酒大麦、葡萄、油橄榄、杏、李、柿、石榴	干鲜瓜果、林果业
		云贵高原地区	油菜、绿肥、燕麦、黑麦、蔓菁、梗稻	旱作耐凉杂粮
		新疆高海拔山区	春小麦、马铃薯、青稞、甜菜、油菜、啤酒花、长绒棉	绿洲灌溉农业
牧业	IV 以牧为主高原早冷区	内蒙古高原中北部、宁、甘、陕、晋北部、冀北高原、新疆天山以南以北	畜种：牛、细毛羊、马 畜产品：牛奶、羊绒	特色种养业及加工业、农牧互补的营养体农业
		新疆阿尔泰山西南坡、昆仑山、准噶尔盆地东部的断块山地	畜种：大尾羊、牦牛、马	
	V 以牧为主高山高寒区	甘肃及青海部分地区（祁连山区）	畜种：优质细毛羊、绒山羊 畜产品：牦牛肉、滩羊皮及羔羊肉、羊毛、山羊绒、驼毛及驼绒	高原特色畜禽类
		新疆天山地区	畜种：牦牛、裘皮羊、骆驼、藏羊、巴里坤马、伊犁马、细毛羊、山羊	

4 面向新时代粮食安全观的冷凉型农业多尺度响应

“国以民为本，民以食为天，食以安为先，安以质为本”。面对全球化、老龄化、生态化等一系列全新的世情、国情、粮情，新时期粮食安全内涵已从数量安全到居民饮食营养、产业结构体系、土地资源环境以及国际贸易市场等多维度的安全系统。在新时代粮食安全观的要求下，冷凉地区农业发展对保障粮食安全具有全球—国家—地方一个人的多维尺度交互响应作用（图7）。即从全球尺度保障过程的稳定性（stability），从国家

角度保障供给的可供性 (availability), 从地方尺度保障需求的获得性 (accessibility), 从个人尺度保障消费的营养性 (utilization)。由于形成冷凉生态的气候条件不可控, 冷凉地区的环境具有发展的唯一性和不可取代性, 冷凉型农业是未来中国面向新时代粮食安全观进行农业开发的重要方向。

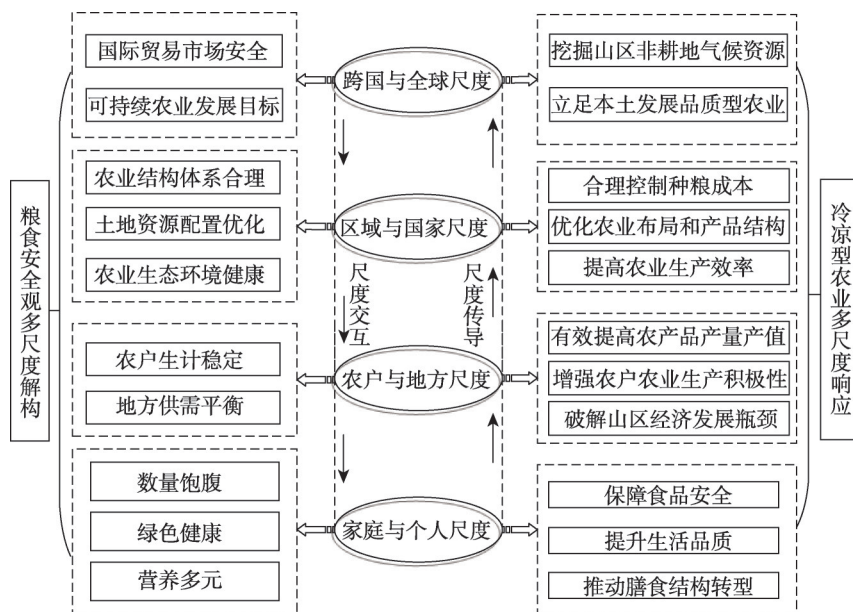


图7 冷凉型农业开发对新时代粮食安全观的多尺度响应

Fig. 7 Multi-scale response of cold and cool agriculture to the new age view of food security

#### 4.1 跨国与全球尺度

全球尺度粮食安全问题关系到关税和粮食补贴政策等国际间粮食贸易、国际碳减排的博弈和减少贫困的联合国可持续发展目标的实现等全球尺度事件。随着新型冠状病毒肺炎疫情在全球的蔓延以及疫情防控转为常态化趋势, 各国增加粮食储备的倾向抬头, 加之中美经贸摩擦抬高了粮食进口成本, 打破了国际粮食贸易的稳定预期。习近平总书记指出“一个国家只有立足粮食基本自给, 才能掌握粮食安全的主动权, 进而才能掌握经济社会发展这个大局”<sup>[47]</sup>。当前中国大面积作物的平均产量仅占气候生产潜力的30%~60%, 而非耕地的农业气候资源生产量是全国总量的82%<sup>[12]</sup>。因此, 占国土面积70%的草地和林地对农业空间资源在广度与深度的开发上尚有相当潜力。在当前国际安全局势动荡的背景下, 为避免受制于人, 充分挖掘冷凉地区农业生产潜力是立足中国本土提高粮食自给率, 解决品质型农作物供给问题的有效途径。通过统筹利用耕地、林地、草原农业气候资源, 提高非耕地林牧利用程度和生产水平, 有利于提高国内可持续的粮食综合生产能力与储备能力, 实现保障中国粮食安全的重要目标。

#### 4.2 区域与国家尺度

在区域与国家尺度重点强调粮食主产区和非主产区差异化发展, 不同农产品在不同区域具有不同的比较优势, 区域农业结构的战略性调整应立足于当地农业气候资源条件, 避免结构趋同。由于海拔与地形条件导致山区可利用土地资源有限, 客观上造成第

一产业发展先天不足,虽具有冷凉生态的优势条件,但农业发展仍主要沿用传统农业的产品结构和生产模式,农畜产品品质较低,在全国及国际市场上缺乏竞争优势。因此,冷凉地区农业发展思路应将低温干旱的资源劣势转化为喜凉作物农业生产的气候优势,依照自然科学规律与生物学规律打造冷凉地区完全不同于东部地区现代农业体系、中部地区粮油生产的特色农业体系,而不是投入大量资金技术在提高热量供应方面,与全国其他农业优势区域比拼短期高产量。通过对山地气候资源在广度与深度的挖潜,拓宽了资源利用和食物来源,有利于优化农业生产布局,推进农业供给侧结构性改革,使中国由粮食生产大国迈向粮食产业强国。

#### 4.3 农户与地方尺度

从农户与地方尺度来看,保障粮食安全就要保障重要农产品有效供给和促进农民持续增收。中国粮食生产始终存在着数量与质量的矛盾,当前通过提高复种指数、使用高产品种、使用化肥农药等手段,在提高单产水平的同时也造成粮食品质与经济效益低下,危害生态环境等问题。而冷凉区在农牧业方面通过套种、轮作模式,积极发展粮草兼作、农牧结合的种养模式,能够提高资源综合利用效率,降低农业生产成本,提高粮食生产附加值与农业生产效率。同时,冷凉地区以特色、优质、绿色、安全的产品生产为主要发展对象,在加工和品牌打造方面突出以品质和质量取胜的价值观,以优质化、高档化、生态化抵抗国外产品的廉价竞争,在减少生产总产量的同时实现经济总量的翻番,能够显著提高农民农业生产积极性。冷凉区品质资源的规模开发通过推动粮食生产的专业化和优质化,打造以高品质创造高收益的全国冷凉经济可持续发展路径,将改变本地农户的生计体系,重塑乡村产业体系,破解山地经济发展的瓶颈。

#### 4.4 家庭与个人尺度

回归到个人意义上讲,随着人们生活水平的提高与健康意识的增强,新时代中国粮食安全观不仅仅表现为数量安全,更是品质安全(包括粮食营养物质含量及人口营养状况)与卫生安全(食品在生产、储存、加工等环节的卫生健康状况)的有机统一。居民在注重食物饱腹、基本理化特性及外观外,营养功能成分、口感指标以及是否绿色安全成为关注的热点和重点,这也正是冷凉地区农产品的优势所在。由于独特的气候条件、农业结构与开发历史,使冷凉地区具备品质型农作物的孕育条件,其种植的谷薯、果品、蔬菜、肉蛋奶等各类食物的品质更高,病虫害少,面向消费转型带来的庞大市场需求,可以满足人们对膳食纤维、蛋白、维生素和微量元素的多样化需求。

### 5 结论与讨论

大范围地貌格局及其区位决定了中国的生态环境分异,中国冷凉区特色农业存在和发展的决定性因素在于产品的优质性与区域的唯一性。本文明确了冷凉地区的概念与地理范围,通过论述冷凉生态对品质型农畜产品的影响及成因,构建反映区域自然特征的冷凉区农业功能分区指标体系进行分区特征的识别,明确各类型农业区发展类型、主栽作物和主养品种以及主要发展方向。通过反映区内农业类型与功能差异,寻求冷凉地区农业发展趋利避害甚至变害为利的科学对策,为因地制宜制定特色农业功能与布局提供科学依据。在当前国民需求层次叠进与社会发展进程交互耦合的要求下,充分挖掘和利用冷凉生态资源优势发展山区特色品质型农业,是持续推进农业现代化与乡村振兴战

略,立足本土保障粮食安全的有效途径。

自然因素综合作用所形成的冷凉生态是区域农畜产品具有优良品质特征的基本条件,而优良品质是冷凉生态地区作物和家畜营养代谢以适应本地区自然条件的必然结果。在实际生产中必须通过综合研究获得足够的农作物生长与自然环境的数据,系统完整地研究农作物特色品质与生态条件之间的关系,寻找起关键作用的环境因子,以更准确地指导农业生产、促进相关学科的发展。目前科学界对动植物的生理、生化、生态等方面的研究已经比较完善,学科也比较齐全,但是对冷凉生态地区的动植物生理的研究,特别是在冷凉农牧业生态研究方面尚属空白,尚未形成冷凉生理生态方面系统的学术理论。未来应更加深入挖掘冷凉生态地区动植物的发展规律、生长规律,以充分认识自然、利用自然为人类服务。此外,本文在农业类型划分方面针对全国宏观尺度进行五种农业类型的分类分区,可能存在兼并类型,忽视其内部分异的情况,后续研究可在省、市、县三级进行内部分类的细化,结合区位和社会经济数据以及作物产量数据,尝试提出不同作物种植的气候优势区和发展潜力区,促进中国发展高产优质的农业布局优化。

## 参考文献(References):

- [1] 刘彦随,陆大道. 中国农业结构调整基本态势与区域效应. 地理学报, 2003, 58(3): 381-389. [LIU Y S, LU D A. The basic trend and regional effect of agricultural structure adjustment in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 381-389.]
- [2] 刘彦随,王大伟,彭留英. 中国农业地理学研究的进展与趋向. 地理学报, 2004, 59(s1): 175-182. [LIU Y S, WANG D W, PENG L Y. Recent progress in agricultural geography and its trends in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(s1): 175-182.]
- [3] GE D, LONG H, ZHANG Y, et al. Farmland transition and its influences on grain production in China. *Land Use Policy*, 2018, 70: 94-105.
- [4] 谢高地,成升魁,肖玉,等. 新时期中国粮食供需平衡态势及粮食安全观的重构. 自然资源学报, 2017, 32(6): 895-903. [XIE G D, CHENG S K, XIAO Y, et al. The balance between grain supply and demand and the reconstruction of China's food security strategy in the new period. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 895-903.]
- [5] 戈大专,龙花楼,乔伟峰. 改革开放以来我国粮食生产转型分析及展望. 自然资源学报, 2019, 34(3): 658-670. [GE D Z, LONG H L, QIAO W F. The transformation of China's grain production since reform and opening-up and its prospects. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 658-670.]
- [6] 习近平. 论“三农”工作. 北京: 中央文献出版社, 2022: 241-242. [XI J P. On the Work of "Three Rural Issues". Beijing: Central Party Literature Press, 2022: 241-242.]
- [7] 成升魁,李云云,刘晓洁,等. 关于新时代我国粮食安全观的思考. 自然资源学报, 2018, 33(6): 911-926. [CHENG S K, LI Y Y, LIU X J, et al. Thoughts on food security in China in the new period. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 911-926.]
- [8] JIAO X Q, HE G, CUI Z L, et al. Agri-environment policy for grain production in China: Toward sustainable intensification. *China Agricultural Economic Review*, 2018, 10: 78-92.
- [9] 周国华,龙花楼,林万龙,等. 新时代“三农”问题和乡村振兴的理论思考与实践发展. 自然资源学报, 2023, 38(8): 1919-1940. [ZHOU G H, LONG H L, LIN W L, et al. Theoretical debates and practical development of the "three rural issues" and rural revitalization in the New Era. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(8): 1919-1940.]
- [10] 梁鑫源,金晓斌,孙瑞,等. 粮食安全视角下的土地资源优化配置及其关键问题. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3031-3053. [LIANG X Y, JIN X B, SUN R, et al. Optimal allocation of land resources and its key issues from a perspective of food security. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 3031-3053.]
- [11] 毛丽萍,赵婧,巫东堂. 山西省夏秋冷凉蔬菜产业发展现状、问题及建议. 山西农业科学, 2017, 45(7): 1178-1180.



- [MAO L P, ZHAO J, WU D T. Present situation, problems and suggestions of cold vegetable industry in summer and autumn of Shanxi province. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(7): 1178-1180.]
- [12] 崔读昌. 中国农业气候学. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1999. [CUI D C. Chinese Agroclimatology. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1999.]
- [13] 温铁军. 以“三新”思想全面引领乡村振兴. 重庆行政, 2021, 22(2): 16-18. [WEN T J. Guiding rural revitalization comprehensively with three new thoughts. *Chongqing Administration*, 2021, 22(2): 16-18.]
- [14] 叶尔马科夫耶尔马科夫, 阿拉西莫维契. 蔬菜生物化学. 龚立三 译. 北京: 农业出版社, 1964. [ЕРМАКОВ А И, АРАСИМОВИЧ В В. Vegetable Biochemistry. Translated by GONG S L. Beijing: Agricultural Press, 1964.]
- [15] 李世奎, 候光良, 欧阳海, 等. 中国农业气候资源和农业气候区划. 北京: 科学出版社, 1988: 22-24. [LI S K, HOU G L, OUYANG H, et al. Agroclimatic Resources and Agroclimatic Zoning in China. Beijing: Science Press, 1988: 22-24.]
- [16] 江小莉, 温铁军, 施俊林. “两山”理念的三阶段发展内涵和实践路径研究. 农村经济, 2021, (4): 1-8. [JIANG X L, WEN T J, SHI J L. Three-phase development connotation and practice paths of the "Two Mountains" Concept. *Rural Economy*, 2021, (4): 1-8.]
- [17] 关慧明. 气流循环暨冷凉生态对农业的影响及利用. 北京: 群众出版社, 2013. [GUAN H M. Impact and Utilization of Air Circulation Cum Cool Ecology on Agriculture. Beijing: Mass Press, 2013.]
- [18] 索亚林, 兰妮, 兰云峰. 中国北方冷凉气候生态经济带(区)发展分析与展望. 农业展望, 2020, 16(12): 72-77, 84. [SUO Y L, LAN N, LAN Y F. Analysis and prospect of the development of eco-economic zones (regions) with cold climate in Northern China. *Agricultural Outlook*, 2020, 16(12): 72-77, 84.]
- [19] 颜亮东, 伏洋, 李凤霞, 等. 青海省冷凉气候资源分区及其开发利用. 资源科学, 2006, 28(1): 157-162. [YAN L D, FU Y, LI F X, et al. Cold climate regionalization and the development and utilization of climate resources in Qinghai province. *Resources Science*, 2006, 28(1): 157-162.]
- [20] 张平军. 武威市天祝藏族自治县的生态环境与畜牧业发展: 甘肃草原生态建设与特色畜牧业发展调查的分类研究(之十). 甘肃畜牧兽医, 2014, 44(11): 35-37, 57. [ZHANG P J. Ecological environment and animal husbandry development in Tianzhu Tibetan autonomous county, Wuwei city: A classification study on the survey of grassland ecological construction and special livestock development in Gansu (No. 10). *Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2014, 44(11): 35-37, 57.]
- [21] 韩慧君. 气候生态因素对棉花产量与纤维品质的影响. 中国农业科学, 1991, 24(5): 23-29. [HAN H J. Effects of climatic-ecologic factors on cotton yield and fibrequality. *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, 24(5): 23-29.]
- [22] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 等. 植物物候与气候研究进展. 生态学报, 2010, 30(2): 447-454. [WANG L X, CHEN H L, LI Q, et al. Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 447-454.]
- [23] 全国农业区划委员会. 中国综合农业区划. 北京: 农业出版社, 1981. [National Agricultural Regionalization Commission. Comprehensive Agricultural Regionalization of China. Beijing: China Agriculture Press, 1981.]
- [24] 朱有勇, 李元. 农业生态环境多样性与作物响应. 北京: 科学出版社, 2012. [ZHU Y Y, LI Y. Agroecological Diversity and Crop Response. Beijing: Science Press, 2012.]
- [25] 欧阳海, 郑步忠, 王雪娥, 等. 农业气候学. 北京: 气象出版社, 1990: 229-237. [OUYANG H, ZHENG B Z, WANG X E, et al. Agroclimatology. Beijing: Meteorological Press, 1990: 229-237.]
- [26] 陈尚谟, 黄寿波, 温福光. 果树气象学. 北京: 气象出版社, 1988. [CHEN S M, HUANG S B, WEN F G. Fruit Tree Meteorology. Beijing: Meteorological Press, 1988.]
- [27] 中国农林作物气候区划协作组. 中国农林作物气候区划. 北京: 气象出版社, 1987. [China Agricultural and Forestry Crop Climate Zoning Collaborative Group. Climatic Zoning of Agricultural and Forestry Crops in China. Beijing: Meteorological Press, 1987.]
- [28] 李进霞. 近代中国农业生产结构的演变研究. 厦门: 厦门大学出版社, 2021. [LI J X. A Study on the Evolution of Agricultural Production Structure in Modern China. Xiamen: Xiamen University Press, 2021.]
- [29] 达莫塔. 大豆与天气. 刘树泽 译. 北京: 气象出版社, 1981. [DAMOTA F S. Soybeans and Weather. Translated by LIU S Z. Beijing: Meteorological Press, 1981.]
- [30] 潘铁夫. 大豆气象. 北京: 农业出版社, 1989. [PAN T F. Soybean Weather. Beijing: Agricultural Press, 1989.]
- [31] 毛如志, 张国涛, 邵建辉, 等. 低海拔和高海拔产区气象因子对‘美乐’葡萄浆果品质和代谢组的影响. 中国生态农业

- 学报, 2016, 24(4): 506-516. [MAO R Z, ZHANG G T, SHAO J H, et al. Response of 'Merlot' grape berry quality and metabolome to meteorological factors at both low and high altitudes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 506-516.]
- [32] 罗文文, 高琛稀, 张东, 等. 不同海拔环境因子对富士苹果叶片和果实品质的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2243-2250. [LUO W W, GAO C X, ZHANG D, et al. Effects of environmental factors at different altitudes on leaves and fruit quality of Fuji apple. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2243-2250.]
- [33] KÖPPEN W. The temperature zones of the earth considered in relation to the duration of hot, temperate, and cold periods, and to the effect of temperature upon the organic world. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 11(56): 255-267.
- [34] ARAKAWA A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2493-2525.
- [35] 张志斌. 我国夏秋冷凉蔬菜的发展. *中国蔬菜*, 2012, (15): 4-6. [ZHANG Z B. The development of our summer and autumn cool vegetables. *China Vegetables*, 2012, (15): 4-6.]
- [36] 张义丰, 王又丰, 刘录祥, 等. 河北省阳原县冷凉性气候资源开发与蔬菜产业结构调整. *地理科学进展*, 2002, 21(4): 374-382. [ZHANG Y F, WANG Y F, LIU L X, et al. Exploitation of cool-cold weather resource and structure adjustment of vegetable industry of Yangyuan county, Hebei province. *Progress in Geography*, 2002, 21(4): 374-382.]
- [37] 张毅功, 臧士国, 张爱军, 等. 太行山冷凉区域气候资源的农业利用技术: 以河北省顺平县复兴村为例. *山地学报*, 2001, 19(3): 270-273. [ZHANG Y G, ZANG S G, ZHANG A J, et al. Application of agricultural climatic resources at cold and cool areas in Mt. Taihang: A case study on Fuxing village in Shunping county of Hebei province. *Mountain Research*, 2001, 19(3): 270-273.]
- [38] 肖修炎, 幸纬汉, 吴战平, 等. 中国热带亚热带西部山区热量带划分的讨论. *应用气象学报*, 1994, 5(3): 340-346. [XIAO X Y, XING W H, WU Z P, et al. A discussion of the thermal zone division in the western tropical and subtropical mountains of China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1994, 5(3): 340-346.]
- [39] 周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724. [ZHOU C H, CHENG W M, QIAN J K, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [40] 刘宝枢, 吕忆梅. 亚热带山区气候资源利用研究: I. 天目山区夏秋季节气候与番茄适应性. *农业气象*, 1987, 8(4): 1-5. [LIU B S, LYU Y M. A study on utilization of the climatic resource in subtropical mountain areas. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1987, 8(4): 1-5.]
- [41] 刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. *地理学报*, 2018, 73(2): 203-218. [LIU Y S, ZHANG Z W, WANG J Y. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 203-218.]
- [42] 方创琳, 刘海猛, 罗奎, 等. 中国人文地理综合区划. *地理学报*, 2017, 72(2): 179-196. [FANG C L, LIU H M, LUO K, et al. Comprehensive regionalization of human geography in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 179-196.]
- [43] 纪瑞鹏, 陈鹏狮, 冯锐, 等. 农业气候资源综合评价方法研究: 以辽宁省为例. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 121-130. [JI R P, CHEN P S, FENG R, et al. A study on comprehensive evaluation method of agro-climate resources: A case study in Liaoning province. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 121-130.]
- [44] 封志明, 张丹, 杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性. *吉林大学社会科学学报*, 2011, 51(1): 146-151, 160. [FENG Z M, ZHANG D, YANG Y Z. Relief degree of land surface in China at county level based on GIS and its correlation between population density and economic development. *Jilin University Journal Social Sciences Edition*, 2011, 51(1): 146-151, 160.]
- [45] 徐新良. 中国气象要素年度空间插值数据集. 资源环境科学数据注册与出版系统, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2022. [XU X L. Annual spatial interpolation dataset of Chinese meteorological elements. Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2022.]
- [46] 樊杰, 周侃, 盛科荣, 等. 中国陆域综合功能区及其划分方案. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(2): 236-255. [FAN J, ZHOU K, SHENG K R, et al. Territorial function differentiation and its comprehensive regionalization in China. *Scientia Sinica: Terrae*, 2023, 53(2): 236-255.]

- [47] 习近平. 坚持把解决好“三农”问题作为全党工作重中之重, 举全党全社会之力推动乡村振兴. 求是, 2022, (4): 4-10. [XI J P. Insist on addressing the "three rural issues" as the top priority of the whole party, and promote the revitalization of the countryside with the efforts of the whole party and society. Seek the Truth, 2022, (4): 4-10.]

## Identification, development and insight of cold and cool agro-ecological resources in the middle altitude region of China

HU Shu-yun<sup>1,2</sup>, LU Yu-qi<sup>1,2,3,4</sup>, HU Guo-jian<sup>5</sup>

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. College of Rural Vitalization, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 5. College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** Eating well has become the core issue of food security in the new situation. By clarifying the concept and scope definition of cold and cool areas, *K*-means clustering was used to spatially identify and type 43500 grid elements with 10 km accuracy in China's mid-altitude cold and cool regions with agricultural production as the dominant function. The results show that: (1) The mid-altitude cold and cool regions cover an area of about 2.63 million km<sup>2</sup>, accounting for roughly 28.47% of the total land area, and are mainly concentrated in the mountainous and plateau topography of nine provincial-level regions in the northeast, northwest and southwest parts of China. (2) The mid-altitude cold and cool regions can be divided into five types of agricultural development: forest-dominated mountain wet and cold regions, forest-dominated alpine warm and cold regions, agriculture-dominated cropland arid and cold regions, pasture-dominated plateau arid and cold regions, and pasture-dominated alpine high and cold regions. (3) The raster area of farming, forestry and animal husbandry favourable development area is 9.97%, 55.82% and 34.21%, and the district and county share is 27.34%, 35.90% and 36.76%, respectively. This paper provides a scientific basis for exploring the combination of characteristic agricultural layout and unique cold climate resources in mountainous areas, which is of great practical significance for ensuring food security and realising the rural revitalisation strategy in the new period.

**Keywords:** cold and cool economy; cold and cool climate; mountain special agriculture; agricultural type zoning; food security perspective