

引用格式:彭秋志, 朱丹. 中国县域地面坡谱分级及其与人口分布的关系[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1799-1808. [Peng Q Z, Zhu D. Classification of land surface slope spectrum and its relationship with population distribution in China at county scale[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1799-1808.] DOI: 10.18402/resci.2022.09.05

中国县域地面坡谱分级及其与人口分布的关系

彭秋志^{1,2,3}, 朱丹¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093; 3. 云南省自然资源与规划智慧创新实验室, 昆明 650093)

摘要:针对平均坡度指标难以稳健描述地面坡谱特征的问题,提出一种基于频率累加分位归并的坡谱分级方法。作为验证,运用数字高程模型数据将全国县域分为5个坡级,借助2000年和2020年人口普查数据分析了坡级与人口分布的关系。结果发现:①所提出的分级方法包含频率累加曲线的构建、基于分位数的参考曲线生成、基于相似度的类型归并3个关键步骤,由此得到的全国县域坡级划分方案具备稳健坡度梯度性、宏观空间连片性以及清晰地学含义。②全国县域人口数量总体保持随坡级升高而波动式缩小的特征,且二者间呈现明显的线性负相关关系,线性拟合 R^2 从2000年的0.761上升到了2020年的0.845,20年间人口总数变化量与坡级的线性拟合 R^2 达0.963;人口密度的极端值对其自身的坡级分布有较大影响,当剔除人口密度小于20人/km²和大于2000人/km²的区域后,两个分析年份全国县域人口密度均稳健保持着随坡级升高而线性减小($R^2 > 0.985$)。本文为稳健表达如坡度等环境梯度提供了一种新的可行分级方法,并深化了对中国县域人口分布与坡度关系的认识。

关键词:人口分布;地形表达;地面坡谱;坡度梯度;县域;中国

DOI: 10.18402/resci.2022.09.05

1 引言

人口分布深刻影响着区域发展,因而一直是人口地理学研究热点。影响人口分布的因素一般被划分为自然因素和社会经济因素两类。自然因素往往构建出人口分布的基础格局^[1],社会经济因素则不断对人口分布进行着再调节。随着人类改造自然能力逐渐提升,社会经济因素的再调节作用日益增强,但人口分布终究无法完全摆脱来自气候、地形等自然因素的宏观制约^[2-4]。如何更好量化自然因素对人口分布的影响,一直是相关领域研究的努力方向。

地形是影响人口分布最重要的自然因子之一^[5,6]。目前已开展了大量有关地形与人口关系的研究^[7,8],引入或发展了一系列地形因子及其表达方式,常见因子有高程(海拔)、坡度、地形起伏度等^[9,10]。高程可在全球范围一致地反映地表的绝对高低,以其简

单易得而广获选用。宏观尺度和众多局域尺度的研究表明,人口数量及人口密度均常与高程负相关^[2,11-14],但也有不少局域尺度研究发现了更复杂的关系^[15-18]。坡度直接派生自高程,侧重反映微观地形的陡缓程度。与高程相比,坡度与人口的负相关关系往往更普遍也更显著^[16-19]。地形起伏度的计算尺度远小于高程而略大于坡度,重在表达局域地形的高低起伏。在人口地理学研究领域出现了多种地形起伏度表达方式,其中最简单常见的是相对高差法^[20],其他较常见的还有兼顾相对高差与平地占比的二元复合法^[21],以及进一步加入高程信息的三元复合法^[22]。地形起伏度与人口密度的负相关程度常与坡度较为接近,有的区域略强^[13,16],有的区域略弱^[17]。除高程、坡度和地形起伏度外,坡向、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数、坡度变率、坡向变率、蚕食度、深切度等也偶见使用^[23-25]。尽管涉

收稿日期:2022-03-30 修订日期:2022-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41961039)。

作者简介:彭秋志,男,云南文山山人,博士,讲师,主要研究方向为国土空间优化。E-mail: pengqiuzhi@kust.edu.cn

及地形与人口关系的研究已为数众多,但绝大多数研究更关注如何选用现有地形因子,较少关心地形因子的优化组合或表达方式创新问题。学者们对地形起伏度表达方式的复合式创新^[21,22],增强了该指标对人口密度的拟合能力,展示了通过表达方式创新来提高地形因子表现力的可能性。但这类研究目前还十分稀缺,大量地形因子的表达潜力还有待发掘。

坡度兼具高程的简单易得性和地形起伏度的较好表现力,是研究地形与人口关系的三大常用地形因子之一。目前针对坡度本身的表现力优化问题尚少有研究涉及。现有研究大多以统计单元内的平均坡度进行表达,忽视了坡度频率分布常具有的高度偏态性可能导致的偏差^[26]。为解决该问题,本文提出一种基于频率累加分位归并的坡谱分级方法,以期创新坡度表达方式提供一条新的可选途径;并据此方法对全国县域进行坡级划分,借助间隔20年的两次人口普查数据探究人口数量及人口密度与坡级的关系,从而深化有关坡度对人口分布影响规律的认识。

2 数据与方法

2.1 数据采集与处理

2.1.1 分析单元

研究区域为中国除港澳台地区以外的所有县域。县域分析单元来自民政部(<http://www.mca.gov.cn/article/sj/xzqh>)截至2020年12月31日县级以上行政区划代码表,共含2844个县级行政单元。在此基础上,为实现研究区内空间全覆盖,还计入4个无下辖县的地级行政单元即东莞市、中山市、儋州市和嘉峪关市,以及3个特殊县级行政单位即苏州工业园区、加格达奇区和大柴旦行政区,最终确定2851个分析单元。

2.1.2 人口数据

县域人口数据采用常住人口,其中2000年(即第五次全国人口普查,简称“五普”)数据来自《2000年人口普查分县资料》^[27],2020年(即“七普”)数据逐一查找自各地政府网站公开发布的第七次人口普查数据公报。对因区划调整、统计范围变化、数据缺失等而产生的数据异常,根据具体县域相关变迁资料进行逐一核查修正和插补,最终统一到前述

分析单元。鉴于2010年的“六普”人口数据在所有分析中均简单介于“五普”和“七普”之间,不能提供更多有用信息,为简化表达,文中未展示。

2.1.3 地面坡谱数据

选用美国地质调查局(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/>)的30 m分辨率SRTMGL1 DEM(数字高程模型)数据,将其转化为坡度栅格,以等差方式(本文选用相对精细的1°级差)对坡度栅格进行重分类,以县域为分区单元对重分类后坡度栅格进行分区统计,由此构建出县域土地面积频率坡谱(又可简称地面坡谱或坡谱)^[28-31]。具体计算公式如下:

$$F_{ij} = A_{ij} / A_i \quad (1)$$

式中: F_{ij} 为*i*县第*j*坡度区段土地面积频率, $j=1,2,\dots,90$; A_{ij} 为*i*县第*j*坡度区段土地面积; A_i 为*i*县土地总面积。

2.2 研究方法

2.2.1 地面坡谱分级

地面坡谱通常不满足正态分布,利用传统常见的平均坡度进行分级容易受极端值影响而产生偏差,尤其无法避免相同坡度平均值对应不同地貌类型组合的“同值异谱”现象,并且在确定分级断点时也不易找到说服力强的依据^[32,33]。为此本文提出一种更为稳健客观的基于频率累加分位归并的坡谱分级方法。以下结合图1介绍该分级方法的3个关键步骤。

步骤一是“累加”,即将频率坡谱转换为频率累加坡谱。转换公式如下:

$$FC_{ij} = \sum_{k=1}^j (A_{i,k} / A_i) \quad (2)$$

式中: FC_{ij} 为*i*县第*j*坡度区段土地面积频率累加值; $A_{i,k}$ 为*i*县第*k*坡度区段土地面积。将频率转换为累加频率是统计检验中的常见做法,该转换可抑制频率曲线中的细小波动从而保留其主干信息。如图1a是随机选取的15条待分级频率坡谱曲线,经转换成频率累加坡谱曲线后(图1b),各曲线变得更为平滑且更易区分。

步骤二是“分位”,即构建用于分级的频率累加坡谱分位值参考曲线。设分级数为*n*,分级序号为*t*($t=1,2,\dots,n$),则某一坡度区段上第*t*坡级参考取值所对应的分位位置*P_t*由下式确定:

$$P_t = (t/n - 1/2n) \times 100\% \quad (3)$$

2022年9月

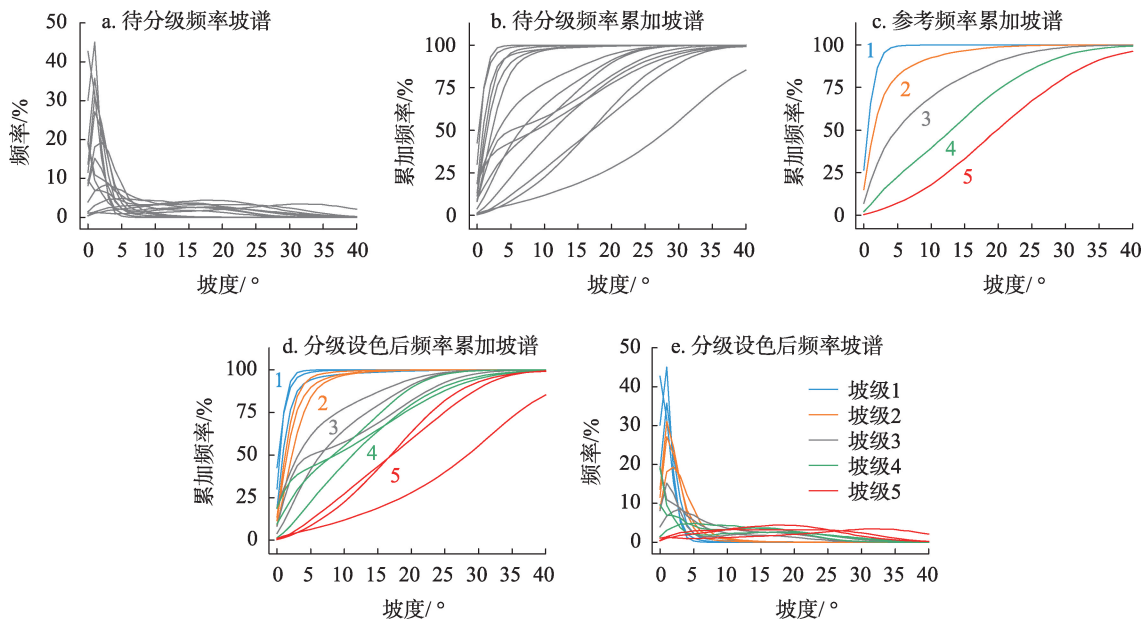


图1 坡级划分原理示意

Figure 1 Schematic diagram of slope level classification principle

以本文使用的5级划分为例,分位位置 P_1 至 P_5 依次是10%、30%、50%、70%、90%。面向全部分析单元的频率累加坡谱,在各坡度区段上分别获取 n 个频率累加分位值,顺次连接各坡度区段的对应分位值即可得到这 n 条参考曲线。图1c示意了基于全国2851个分析单元构建出的5条参考曲线。

步骤三是“归并”,即根据与各参考曲线的靠近程度确定各分析单元所属坡级。据公式(4)依次计算各县域土地面积频率累加坡谱曲线与每条参考曲线的靠近程度,按最靠近原则确定各县域所属坡级。

$$S_{i,r} = \sum_{j=1}^{90} |FC_{i,j} - FC_{r,j}| \quad (4)$$

式中: $S_{i,r}$ 为 i 县频率累加坡谱曲线与第 r 条参考曲线的靠近度,值更小者更靠近; $FC_{r,j}$ 为第 r 条参考曲线第 j 坡度区段的累加频率值。“归并”实质是基于某种“距离”的相似性匹配, $S_{i,r}$ 属于一种简单、直观且常用的绝对值距离^[34]。图1d以分级设色方式显示了频率累加坡谱形态下15个案例县域的坡级归属,图1e是还原后的频率坡谱归属。

从现实意义上看,该分级方法利用了同种地貌类型的对应坡谱往往高度相似的统计规律,据此可破解“同值异谱”难题,使坡度分级结果更契合直观感知。从统计学原理上讲,该分级方法还具有如下特色:①采用频率累加坡谱进行分级,能确保所有

参考曲线在还原为频率坡谱曲线后仍满足频率之和为100%,相较于直接使用频率坡谱更具逻辑完备性,且使分类结果同时具有梯度分级的含义;②在细小间隔坡度区段内单独进行分位归并,既能有效切断临近坡度区段间的取值依赖,又能确保各区段的分级信息集中贡献到分级的最终阶段;③在每一坡度区段内采用分位数方法进行归并,可使每一分级内的样本数量达到相对均衡;④充分利用每一坡度区段信息进行整体匹配,兼顾了均值相近和形态相似,同时也解除了对数据本身频率分布形态的依赖。

2.2.2 观察视角选择及其稳健性判别

分别选择总体视角、平均值视角和中位数视角对特定指标的坡级分布特征进行联合探究。以人口密度为例,总体视角是指研究区总人口与总面积之比,平均值视角是指各县域人口密度的算数平均值,中位数视角是指各县域人口密度的中位数。对特定指标,当基于3个视角得出一致的坡级分布特征时,视其具备不随观察视角改变而变化的稳健性。

3 结果与分析

3.1 县域坡级划分结果及其特征

对各坡级分别统计县域的数量、县域的面积以及平均坡度等基本指标(表1)。在数量构成方面,

表1 坡级划分结果的县域数量、县域面积及坡度特征

Table 1 The number of counties, area of counties, and slope characteristics for each slope level

坡级	县域数量/个	县域占比/%		县域面积/km ²		县域平均坡度/°		总体平均坡度/°
		数量	面积	平均值	中位数	平均值	中位数	
1	655	23.0	12.1	1747	942	1.93	1.86	1.84
2	498	17.5	20.5	3912	1033	4.51	4.52	4.43
3	565	19.8	28.6	4793	1467	8.94	8.88	8.86
4	596	20.9	17.8	2825	1963	15.08	15.06	14.98
5	537	18.8	21.1	3729	2650	22.22	21.35	22.12

各坡级间相对均衡。数量最多的坡级1有655个县域,数量最少的坡级2有498个县域,二者之比仅为1.32倍。在面积指标方面,坡级分布随观察视角而变。从总面积占比视角看,最大值是最小值的2.36倍,非均衡性明显大于数量构成;就县域面积随坡级升高的变化趋势而言,以平均值看并无明显规律,但换成中位数后则可用二项式趋势线进行高度拟合(图2a)。在坡度指标方面,坡级分布特征具备很好的稳健性。平均坡度在总体值、平均值和中位数视角下都与坡级显著正相关,且均可用二项式趋势线进行高度拟合(图2b)。总之,坡级划分结果呈现数量相对均衡、面积差异较大、坡度梯度连续而稳健的特征。其中不同面积指标出现较大差异的现象提示,当针对与面积相关的指标(如人口密度)进行集中趋势度量时,选用中位数比选用平均值更为适宜。

分别针对每一坡级下的全部县域坡谱进行统计后绘成箱形统计图(图3),可进一步直观发现坡谱形态在坡级梯度上的渐变性。坡级1和坡级5分

别代表了缓与陡的两端,前者的地面坡度基本集中在0°~5°的平地区域,后者则近乎均匀分布。若以是否存在明显趋平集中性为标准进行归并,则坡级2与坡级3更接近坡级1,而坡级4更偏向坡级5。

除了在坡度统计指标和坡谱形态特征方面的稳健梯度特征外,坡级在空间分布上也有明显规律性(图4)。一是各坡级的空间分布呈现明显空间连片性,且多与地貌单元相对应。坡级1的两个最大连片区与中国三大平原即东北平原、华北平原和长江中下游平原相对应;坡级2的主体部分主要与内蒙古高原对应;坡级3的最大连片区位于西北青藏高原及塔里木盆地一带;坡级4主体分布于南方的东南丘陵及云贵高原一带,在北方则主要分布在黄土高原、太行山、燕山、长白山一线;坡级5多被坡级4所围,最大一块连片区北至秦岭、东达中国地势二三级阶梯分界线、西北至藏北高原东南缘,次大一块连片区位于浙闽丘陵一带。二是海洋季风的影响范围在坡级空间分布中也得到了体现。东南半壁受季风影响的外流区域主要由坡级1、坡级4和坡

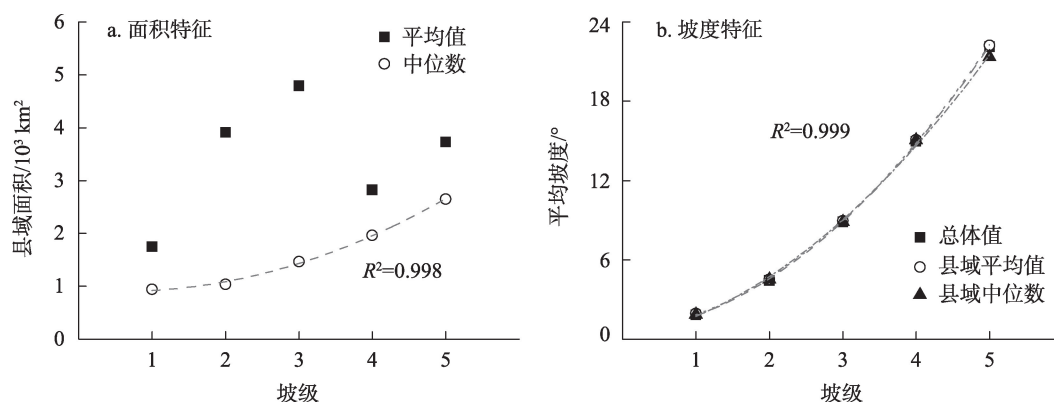


图2 县域面积与坡级的关系、坡度指标与坡级的关系

Figure 2 Relationship between area and slope levels, and relationship between slope index and slope levels

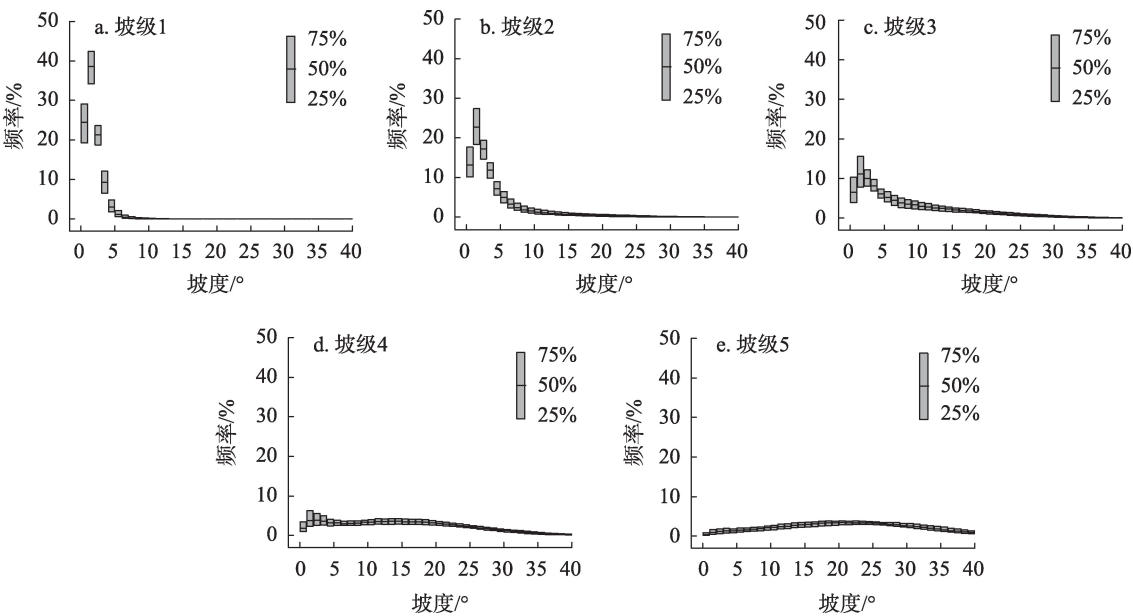


图3 各坡级的坡谱箱图对比

Figure 3 Comparison of slope spectrum box plots for each slope level

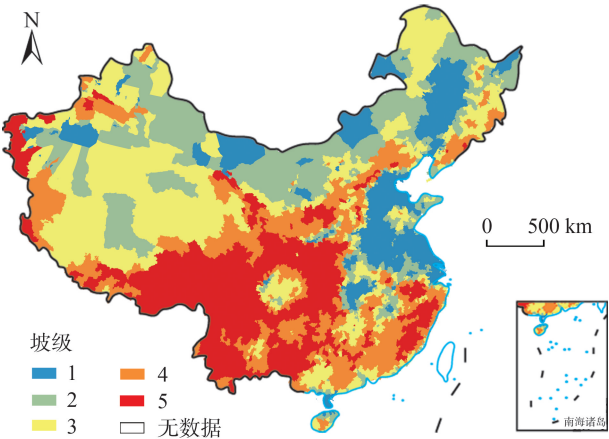


图4 中国县域坡级空间分布

Figure 4 Spatial distribution of slope levels at the county scale in China

注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1603号的标准地图制作,底图无修改。

级5构成,而西北半壁内陆区域主要由坡级2和坡级3构成。强烈的流水作用造就了东南半壁的大侵蚀(坡级4和坡级5)和大堆积(坡级1)特征。大侵蚀的直接结果是更陡的地形坡度,具体可表现为更大的起伏度如横断山区和秦巴山区,或对应着更破碎的地形如南方喀斯特山地丘陵区 and 北方黄土丘陵沟壑区。具备大侵蚀特征的坡级4和坡级5区域,恰好基本对应着中国主要的滑坡泥石流地质灾

害易发多发区^[35]。

3.2 人口的坡级分布

3.2.1 人口数量的坡级分布

对比两次人口普查可发现(表2,图5),人口总数维持着随坡级升高而波动式减少的基本特征。在不考虑坡级2时,两次人口普查的人口总数均体现出随坡级升高而递次减少的特点,但在加入坡级2后,都出现了一个干扰递减趋势的局部凹陷。坡级2本身县域数量相对最少(表1),且大面积分布在胡焕庸线以西的人口稀疏区(图4),小部分分布在胡焕庸线以东的山地-平原过渡带。在气候等其他条件适宜的前提下,坡级2更符合风水堪輿选址原则,理论上有很强宜居性,但由于其多处于山地、平原这两类最基本地貌类型的过渡区域,对应的县域数量不多,因而总人口反而少于相邻坡级。

从人口变化的视角则可看出更具线性的坡级

表2 各坡级的人口总数特征

Table 2 Total population characteristics of each slope level				
坡级	“五普”/万人	“七普”/万人	变化量/万人	变化率/%
1	36786	43262	6476	17.6
2	23092	27738	4646	20.1
3	26436	30669	4233	16.0
4	23377	24828	1451	6.2
5	14635	14495	-140	-1.0

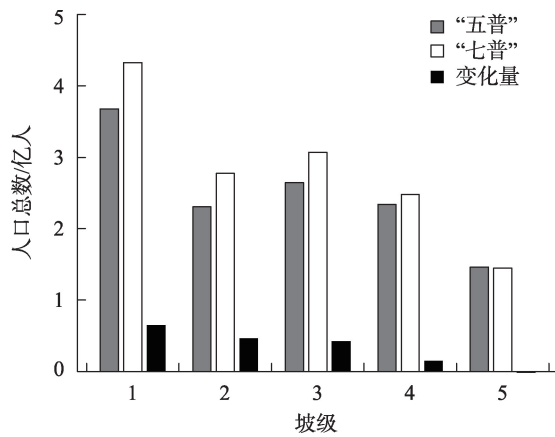


图5 人口数量与坡级的关系

Figure 5 Relationship between population and slope level

递变规律。用线性方程拟合人口总数随坡级的变化,“五普”时 $R^2 = 0.761$, $P=0.054$,“七普”时 $R^2 = 0.845$, $P<0.050$,说明人口总数与坡级间的线性关系已变得更趋明显。这一变化可直接归结到人口总数变化量与坡级的显著线性负相关关系 ($R^2 = 0.963$, $P<0.010$)上来;并且坡级2具有相对最快的人口增速(20.1%),这对人口总数坡级分布中的局部凹陷也发挥了一定填补作用。

3.2.2 人口密度的坡级分布

比起人口数量,人口密度在人口地理学研究中

往往更受关注。如前所述,由于存在少数超大面积县域带来的偏态分布效应,所以在表达人口密度时,中位数视角更具代表性。如图6a,在中位数视角下,县域人口密度与坡级在“五普”和“七普”时均表现为 $R^2>0.99$ 的显著线性负相关。

作为对比,人口密度在总体视角下以坡级1为独大(图6b),在平均值视角下以坡级2为峰值(图6c),线性关系均远不如中位数视角。究其原因,在总体视角下,坡级2与坡级3均主要因大面积分布在西北人口极端稀疏区而被削弱。以人口密度小于20人/ km^2 的县域为例,其相对整个研究区的人口占比在“五普”和“七普”时分别仅有1.6%和1.5%,但面积占比却分别高达50.6%和49.8%,这无疑大为降低了总体人口密度的代表性。其中坡级2与坡级3面积占比相对更突出(“五普”和“七普”时分别为32.6%和32.5%),因而被削弱得更明显。当尝试除去人口密度小于20人/ km^2 的县域后,总体人口密度随坡级升高的线性递减特征才得以显现(图6d)。在平均值视角下,坡级2因高人口密度(以人口密度大于2000人/ km^2 为例)县域相对最多而被加强。当尝试去除人口密度大于2000人/ km^2 的县域后,县域人口密度平均值随坡级升高的线性递减特征亦得

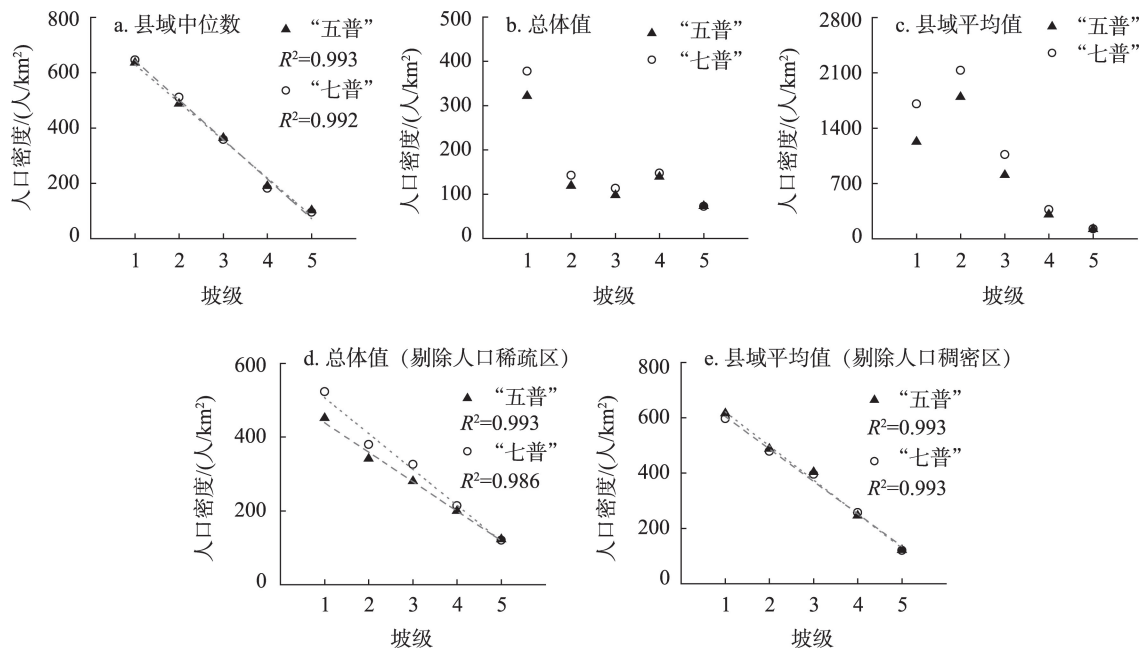


图6 人口密度与坡级的关系

Figure 6 Relationship between population density and slope level

2022年9月

以显现(图6e)。简言之,除去人口过于稀疏和过于稠密的地区,全国县域人口密度可稳健地呈现出随坡级升高而递次减小的特征。

以上关于“小于20人/km²”和“大于2000人/km²”的设定来源于直观观察。为探寻更客观精准的设定值,迭代采用逐个剔除最小人口密度县域后再次计算的方式确定总体视角下的“最佳”设定值,同理采用逐个剔除最大人口密度县域的方式处理平均值视角。结果表明,对总体视角而言,“五普”数据和“七普”数据表现一致,能使线性梯度最显著的最佳设定均是“小于24人/km²”。就平均值视角来说,若要求线性梯度最显著,对“五普”数据的最佳剔除设定是“大于1600人/km²”,“七普”则为“大于1900人/km²”。总之可近似划出一个20~2000人/km²人口密度范围,在此范围内,中国县域人口密度与5个坡级间总体存在稳健的线性负相关关系。

需要指出,受区域异质性的影响^[36,37],全国尺度上所呈现的县域人口密度与坡级间的线性关系,在更小观察尺度下未必成立^[38]。图7以中国四大地理分区中的南方地区和北方地区为例分别进行示意,相较于全国尺度下的线性关系,北方的拟合曲线略有“下凹”,南方则稍显“上凸”。这与北方地区多平原以致坡地建设需求小、南方地区多山多丘陵以致低丘缓坡开发现象多的大背景是吻合的^[39]。

4 结论

本文提出了一种基于频率累加分位归并的坡谱分级方法,利用DEM数据在县域尺度将研究区划分为5个坡级,并借助县域人口普查数据探究了人口数量及人口密度与坡级的关系。主要结论有:

(1)该分级方法针对的是频率分布曲线,包含“累加”“分位”“归并”3个关键步骤;全国县域坡级

划分结果在坡度统计特征和坡谱形态特征方面表现出了连续而稳健的梯度性,在空间分布特征方面表现出了宏观连片性,且能从地貌分布和流水作用方面进行合理解释。

(2)随坡级升高,人口数量呈现显著的线性减少趋势,线性拟合 R^2 在2020年为0.845,比2000年上升了0.084;随坡级升高,人口密度在不同观察视角下呈现不同变化特征,但在不考虑人口极端稀疏区(人口密度<20人/km²)和高度稠密区(人口密度>2000人/km²)时,所选两个年份在各观察视角下均呈现 $R^2>0.985$ 的显著线性减小趋势;人口密度与坡级的关系有一定南北差异,南方体现为中低坡级偏好,北方为低坡级偏好。

本文还发现,在人口极端稀疏和高度稠密的区域,坡度并不能进一步很好地区分和解释人口密度。推测气候、水源等自然条件能对人口极端稀疏区产生更具决定性的影响,此时基本可以忽略地形因子;而在人口高度稠密区,区位、政策、经济等社会经济条件将更为关键。换言之,在自然条件不很恶劣、人类活动也不甚剧烈的地区,坡度对人口分布的影响是基础且稳定的。这就提示,在构建有坡度因子参与的人口分布预测模型时,为使模型更简化和更精准,或有必要预先对坡度因子开展一定的指标处理和适用范围限制。

本文在人口数据和统计单元选择方面仍有不足:人口普查数据因更新周期长而缺乏时效性;县域统计单元存在空间粒度粗、面积形状差异大等缺点,限制了有关分析的精细性和一致性。未来可考虑使用由手机定位大数据生成的格网化人口分布与迁移数据集,使分析结果更具时效性和精准性。

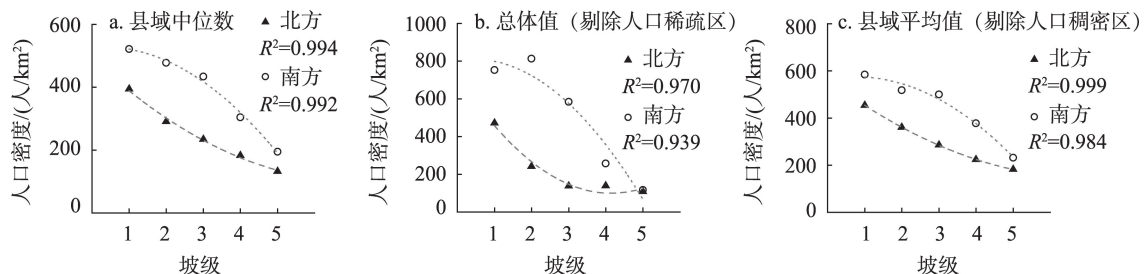


图7 人口密度与坡级关系的南北区域差异

Figure 7 Regional difference of the relationship between population density and slope level in northern and southern China

参考文献(References):

- [1] 刘涛, 彭荣熙, 卓云霞, 等. 2000–2020年中国人口分布格局演变及影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(2): 381–394. [Liu T, Peng R X, Zhuo Y X, et al. China's changing population distribution and influencing factors: Insights from the 2020 census data[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(2): 381–394.]
- [2] 刘杰, 杨青山, 徐一鸣, 等. 中国东南半壁南北方地区人口空间分异格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2022, 42(1): 12–20. [Liu J, Yang Q S, Xu Y M, et al. Spatial differentiation pattern of the population and its influencing factors in the southeastern half of Hu Huanyong Line[J]. Economic Geography, 2022, 42(1): 12–20.]
- [3] 李佳铭, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 148–160. [Li J M, Lu D D, Xu C D, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 148–160.]
- [4] 袁锦标, 曹永旺, 倪方舟, 等. 中国县域人口集聚空间格局及影响因素的空间异质性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(3): 25–33. [Yuan J B, Cao Y W, Ni F Z, et al. A study on the spatial pattern of county population agglomeration and the spatial heterogeneity of its influencing factors in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(3): 25–33.]
- [5] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用[J]. 地理学报, 2020, 75(2): 255–267. [Qi W, Liu S H, Zhou L. Regional differentiation of population in Tibetan Plateau: Insight from the “Hu Line”[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 255–267.]
- [6] 马定国, 戴雄祖, 羊金凤, 等. 县域村镇建设资源环境承载能力评价及人口合理规模测算: 以江西省永丰县为例[J]. 资源科学, 2020, 42(7): 1249–1261. [Ma D G, Dai X Z, Yang J F, et al. Resource and environmental carrying capacity and optimal population size for village and town development: Taking Yongfeng County of Jiangxi Province as an example[J]. Resources Science, 2020, 42(7): 1249–1261.]
- [7] 钟静, 卢涛. 基于地形起伏度的中国西南地区人口集聚格局演化研究[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8849–8860. [Zhong J, Lu T. Spatial pattern of population distribution and its correlation with relief amplitude in southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8849–8860.]
- [8] 张珊, 查小春, 刘恺云. 地形起伏特征对汉中市人口与经济的空间分布格局影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8): 138–148. [Zhang S, Zha X C, Liu K Y. Research on the influence of topographic relief on the spatial distribution pattern of population and economy in Hanzhong City[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(8): 138–148.]
- [9] 张红旗, 尚二萍, 于竹筱. 基于地形分异指数的黔桂喀斯特山地土地利用垂直分布特征[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1964–1974. [Zhang H Q, Shang E P, Yu Z X. Vertical distribution characteristics of land use in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous region based on terrain differentiation indicators[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1964–1974.]
- [10] 李婧昕, 许尔琪. 中国西南喀斯特地区正负地形的提取方法研究[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1989–1999. [Li J X, Xu E Q. Extraction of positive and negative terrain boundary in Karst region of Southwest China[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1989–1999.]
- [11] 王超, 阚媛珂, 曾业隆, 等. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(4): 664–680. [Wang C, Kan A K, Zeng Y L, et al. Population distribution pattern and influencing factors in Tibet based on random forest model[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(4): 664–680.]
- [12] 陈浩, 董廷旭, 李勇, 等. 基于海拔高程的四川省少数民族自治州人口格局演化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 84–90. [Chen H, Dong T X, Li Y, et al. Evolution of population pattern in the ethnic autonomous prefectures of Sichuan Province based on altitude[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(11): 84–90.]
- [13] 何莎莎, 方斌. 基于栅格的安徽省人口–经济耦合关联及地形梯度差异[J]. 热带地理, 2021, 41(2): 351–363. [He S S, Fang B. Population–economy coupling and its effect on topographic gradient in Anhui province, China based on a grid scale[J]. Tropical Geography, 2021, 41(2): 351–363.]
- [14] 罗君, 石培基, 张学斌. 黄河上游兰西城市群人口时空特征多维透视[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 474–485. [Luo J, Shi P J, Zhang X B. Spatiotemporal characteristics of population distribution in the upper reaches of the Yellow River: A multi-dimensional approach in the Lanzhou–Xining urban agglomeration[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 474–485.]
- [15] 敬博, 李同昇, 温伯清, 等. 基于地形因素的秦巴山区人口–经济空间格局及其影响机制研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 793–803. [Jing B, Li T S, Wen B Q, et al. Population–Economy spatial pattern and impact mechanism of the Qinba mountain area based on topographic factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 793–803.]
- [16] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 基于栅格的豫西山区地形起伏特征及其对人口和经济的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1093–1106. [Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Spatial variation of terrain relief and its impacts on population and economy based on raster data in West Henan Mountain Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(6): 1093–1106.]
- [17] 罗君, 石培基, 张学斌. 兰西城市群人口分布格局及其与地形要素的关系[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 106–115. [Luo J, Shi P J, Zhang X B. Relationship between topographic factors and population distribution in Lanzhou–Xining urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 106–115.]
- [18] 程东亚, 李旭东. 贵州省乌江流域人口分布与地形的关系[J]. 地理研究, 2020, 39(6): 1427–1438. [Cheng D Y, Li X D. Relation-

2022年9月

- ship between population distribution and topography of the Wujiaang River Watershed in Guizhou Province[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1427–1438.]
- [19] 黄安, 许月卿, 孙丕苓, 等. 基于多源数据人口分布空间化研究: 以河北省张家口市为例[J]. *资源科学*, 2017, 39(11): 2186–2196. [Huang A, Xu Y Q, Sun P L, et al. Spatial distribution of population specialization based on multi-source data: A case study of Zhangjiakou City[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2186–2196.]
- [20] 张静静, 李艳红, 朱连奇. 豫西山区县域地形起伏度与人口、经济活动分布的关系[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(2): 55–60. [Zhang J J, Li Y H, Zhu L Q. Relief amplitude based on county units in west Henan mountain area and its correlation with distribution of population and economic activities[J]. *Areal Research and Development*, 2019, 38(2): 55–60.]
- [21] 冯琰玮, 甄江红. 内蒙古自治区人居环境综合适宜性评价及空间优化[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(6): 1204–1217. [Feng Y W, Zhen J H. Comprehensive suitability evaluation and spatial optimization of human settlements environment in Inner Mongolia [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(6): 1204–1217.]
- [22] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 基于GIS的中国人居住环境指数模型的建立与应用[J]. *地理学报*, 2008, 63(12): 1327–1336. [Feng Z M, Tang Y, Yang Y Z, et al. Establishment and application of human settlements environment index model (HEI) based on GIS[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(12): 1327–1336.]
- [23] 王学义, 曾永明. 中国川西地区人口分布与地形因子的空间分析[J]. *中国人口科学*, 2013, (3): 85–93. [Wang X Y, Zeng Y M. Research on population distribution and terrain factors based on spatial econometric modeling[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2013, (3): 85–93.]
- [24] 冯景华, 马国强, 李婧, 等. 基于人口密度与布局适宜性的农村居民点整理策略: 以甘肃省华亭市为例[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 768–776. [Feng J H, Ma G Q, Li J, et al. Strategies of rural settlement consolidation based on population density and adaptability of layout: A case of Huating, Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 768–776.]
- [25] 罗娅, 杨建红, 周秋文, 等. 贵州高原山区正负地形特征及其对人口分布的影响[J]. *世界地理研究*, 2021, 30(1): 204–212. [Luo Y, Yang J H, Zhou Q W, et al. Characteristic of positive and negative terrains and its effect on population distribution in the mountainous area, Guizhou Plateau[J]. *World Regional Studies*, 2021, 30(1): 204–212.]
- [26] 唐铃, 马经纬, 邵志焱, 等. 全球地表坡度频率分布数据集[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2020, 4(1): 24–30. [Tang L, Ma J W, Shao Z Y, et al. Global land slope frequency dataset[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2020, 4(1): 24–30.]
- [27] 国务院人口普查办公室. 2000年人口普查分县资料[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003. [Population Census Office under the State Council. Tabulation on the 2000 Population Census of the People's Republic of China by County[M]. Beijing: China Statistics Press, 2003.]
- [28] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 824–830. [Tang G A, Zhao M D, Li T W, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in loess plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824–830.]
- [29] 林偲蔚, 陈楠, 刘奇祺, 等. 基于DEM小流域复杂网络的黄土高原地貌自动识别研究[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(4): 657–672. [Lin S W, Chen N, Liu Q Q, et al. Geomorphological automatic recognition of Loess Plateau based on complex network of small watershed from DEM[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(4): 657–672.]
- [30] 彭秋志, 唐铃, 陈杰, 等. 2000–2015年深圳市建设用地坡谱演变研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2200–2212. [Peng Q Z, Tang L, Chen J, et al. Study on the evolution of construction land slope spectrum in Shenzhen during 2000–2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2200–2212.]
- [31] 周亮, 党雪薇, 周成虎, 等. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(7): 1747–1762. [Zhou L, Dang X W, Zhou C H, et al. Evolution characteristics of slope spectrum and slope-climbing effects of built-up land in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1747–1762.]
- [32] 汤国安, 宋佳. 基于DEM坡度制图图中坡度分级方法的比较研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 157–160. [Tang G A, Song J. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 157–160.]
- [33] 朱梅, 李发源. 坡度分级对地面坡谱的影响研究[J]. *测绘科学*, 2009, 34(6): 165–167. [Zhu M, Li F Y. Influence of slope classification on slope spectrum[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(6): 165–167.]
- [34] 张金屯. 数量生态学: [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011. [Zhang J T. Quantitative Ecology: [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2011.]
- [35] 国土资源部. 全国地质灾害防治“十三五”规划[R]. 北京: 国土资源部, 2016. [Ministry of Land and Resources. The Prevention and Control of Geological Hazards in the “13th Five Year” Plan [R]. Beijing: Ministry of Land and Resources, 2016.]
- [36] 尹旭, 王婧, 李裕瑞, 等. 中国乡镇人口分布时空变化及其影响因素[J]. *地理研究*, 2022, 41(5): 1245–1261. [Yin X, Wang J, Li Y R, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of Chinese population at town level[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1245–1261.]
- [37] 成方龙, 赵冠伟. 分区策略与机器学习的人口分布精细化模拟[J]. *测绘科学*, 2020, 45(9): 165–173. [Cheng F L, Zhao G W. Fine-scale simulation of population distribution based on zoning strategy and machine learning[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(9): 165–173.]
- [38] 商冉, 曲衍波, 姜怀龙. 人地关系视角下农村居民点转型的时空特征与形成机理[J]. *资源科学*, 2020, 42(4): 672–684. [Shang R,

Qu Y B, Jiang H L. Spatiotemporal characteristics and formation mechanism of rural residential land transition from the perspective of human-land relationship[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 672-684.]

[39] 彭秋志, 马少华, 邓启辉, 等. 山地城市建设用地增长的坡度梯

度效应: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1865-1875. [Peng Q Z, Ma S H, Deng Q H, et al. Relationship between construction land and slope in rapidly expanding mountain cities: A case study in Guiyang, China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(7): 1865-1875.]

Classification of land surface slope spectrum and its relationship with population distribution in China at county scale

PENG Qiuzhi^{1,2,3}, ZHU Dan¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Plateau Mountain Spatial Information Survey Technique Application Engineering Research Center at Yunnan Province's Universities, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Natural Resources and Planning Intelligence Innovation Laboratory, Kunming 650093, China)

Abstract: Average slope index is difficult to describe the characteristics of the slope spectrum robustly, and in order to solve the problem, this study proposed a slope spectrum classification method based on merging by Quantile. As a verification, China was divided into five slope levels at the county scale by using digital elevation model data. The relationship between slope levels and population distribution was analyzed by using the 2000 and 2020 population census data. The results show that: (1) The proposed classification method includes three key steps: constructing the cumulative frequency of slope spectrum curve, generating the reference curve based on Quantile, and the type merging based on similarity. The resulting county-scale slope classification scheme can generate robust slope gradients, continuous agglomeration of large-scale spatial patterns, and clear geographical meanings; (2) Nationally, the total county-scale population showed the characteristic of fluctuating decrease with the increase of the slope level, and there is an obvious negative linear correlation between them. The R^2 of linear fitting increased from 0.761 in 2000 to 0.845 in 2020. The R^2 of linear fitting between the change of the total population and the slope level in the 20-year period was 0.963. The extreme value of population density has a great impact on its slope-level distribution. After excluding the areas with population density lower than 20 persons/km² and higher than 2000 persons/km², the population density of counties in China has steadily maintained a linear decrease with the increase of slope level ($R^2 > 0.985$). This study provided a new classification method for robustly expressing environmental gradients such as slope, and it is helpful for a deeper understanding of the relationship between population distribution and slope in China.

Key words: population distribution; terrain representation; land surface slope spectrum; slope gradient; at county scale; China