

空间自相关分析在面积高程积分中的应用

常直杨¹, 王建^{*1,2}, 白世彪^{1,2}, 张志刚¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘 要: 面积高程积分值(HI)作为揭示区域构造相对活动性的指标,在地貌学中得到了广泛的应用。传统的研究多以流域作为载体分析 HI 值的特性,然而 HI 值是否受流域大小及形状的影响存在争议。以白龙江流域作为试验区,利用 ASTER 30 m 及 SRTM 90 m DEM 数据,基于不同大小的分析窗口分别计算了流域的 HI 值。研究表明:1. 原始 HI 值没有明显的空间分布格局,受分析窗口空间分布位置、DEM 分辨率、岩性差异的影响不大,但是受分析窗口大小的影响较大,存在尺度依赖。2. 对原始 HI 值进行空间自相关分析后,HI 值表现出强的空间自相关性,且“热点分析”表明 HI 值高值聚集区分布在白龙江中上游,与地壳隆升强烈及断裂活跃的作用相关,低值聚集区分布在白龙江下游及一些河谷中。研究表明,空间自相关分析的应用,能够使基于分析窗口提取的 HI 值呈现出更多的构造意义。

关键词: 面积高程积分; 数字高程模型; 构造活动; 白龙江

中图分类号: P931.2

文献标志码: A

构造地貌的研究在社会及经济上具有重要意义,基于 DEM 衍生的地貌参数能够反映构造变形过程,已经被广泛的应用到构造活动地貌的研究中^[1-6]。其中,面积高程积分(HI)是检验构造运动、岩性和气候在地貌演化过程中的相对作用强度最有效的工具之一。随着 GIS 及 DEM 技术的提高,其在地貌学中应用越来越广泛,可对流域地貌发育阶段进行划分^[7-8]、冰川活动强度检测^[9-10]、评价岩性与构造的相对作用^[2,11-12]、评估造山带构造活动性的相对强弱程度^[2,13-14],甚至可以被用在未被实地考察的火星上^[15]。然而,这些研究多利用流域作为研究面积高程积分的载体,HI 值会受流域大小、形状的影响。例如, Korup 等^[16]证明在构造十分活跃区,新西兰地区 HI 值与流域大小显著相关; Walcott 等^[17]在非洲东南部稳定地块的研究表明,HI 值与流域大小及形状没有关系; Cheng 等^[18]在台湾地区的研究表明,当流域达到稳态时,HI 值与流

域大小无关,反之则相关。

为了排除 HI 值受流域大小及形状因素的影响,本研究尝试利用规则格网研究白龙江流域面积高程积分值的分布,该流域地处我国南北地震带及青藏高原向黄土高原的过渡地带^[19],第四纪以来发生了强烈的构造隆升^[20-21],是研究构造与侵蚀作用的天然场所。本文基于该流域 ASTER 30 m 及 SRTM 90 m DEM,分析了不同窗口下(1 km × 1 km, 2 km × 2 km, 4 km × 4 km) HI 值的分布特征,并利用空间自相关技术探讨了 HI 值分布的空间自相关性、热点和冷点区域,以期揭示其构造指示意义。

1 研究区概况

白龙江流域(图 1a)位于青藏高原东缘,流域面积约 31 808 km²,总体地势自西北向东南倾伏,区域内最高山为迭山,海拔 4 920 m。地貌类型包括山地

收稿日期(Received date): 2013-08-24; 改回日期(Accepted): 2013-10-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40871010)。[Supported by National Nature Science Foundation of China (40830742).]

作者简介(Biography): 常直杨(1987-),男,河南济源人,博士研究生,从事 GIS 在地貌研究中的应用研究。[Chang Zhiyang(1987-), male, was born in Jiyuan, Henan Province, Ph.D student, major in the study of geomorphology with GIS.] E-mail: changzhiyang1@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 王建(1962-),男,博士,教授,主要从事地貌演化发展研究。[Wang Jian(1962-), male, Dr. & professor, mainly engaged in the study of evolution of geomorphology.] E-mail: jwang169@vip.sina.com

地貌、河谷地貌、黄土地貌、重力地貌等^[19]。水系不对称发育,其中,白龙江河道是嘉陵江上游最大的一级支流,沿途有白水江、岷江、拱坝河等支流汇入,河流阶地发育。同时,该流域处于青藏高原与秦岭造山带的过渡地带,晚新生代以来,伴随着青藏高原的不断隆升与扩展,构造活动强烈。发育的活动构造主要有沿北西向构造线方向形成的大致互相平行的逆冲褶皱构造带:合作-宕昌-两当断裂带(F_1)、光盖山-迭山断裂带(F_2)、迭部-白龙江断裂带(F_3)、玛沁-玛曲断裂(F_4)、文县断裂(F_5)、在东部构造带的方向偏转为近东西向或北东东向:青川断裂(F_6)、北川-林庵寺断裂(F_7)、江油断裂(F_8) (图 1b)。流域内出露的地层为志留系中、上统,石灰系中下统及二叠系下统,主要岩性有变质砂岩、板岩、千枚岩、灰岩、花岗闪长岩等。考虑到面积高程积分值可能会受到岩性抗侵蚀强度的影响^[4,6],这里我们采用考虑了岩石的物理力学特性及结构条件的工程地质岩组划分方法,得出 11 种岩组^[22] (见图 1b)。

2 研究数据和方法

2.1 数据来源

所使用的 ASTER 30 m 及 SRTM 90 mDEM 数据均下载自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn>),经过投影转换、拼接、裁切、高程异常值重新填补而成。虽然这些 DEM 在水平精度及垂直精度上仍存在一定的误差,但是本研究并非提供地形参数的精确估计,DEM 高程值精度的影响是可以忽略的。

2.2 面积高程积分值计算方法

Pike 与 Wilson 经过数学推导,提出利用高程起伏比作为面积高程积分的简易算法,其定义为^[23]

$$HI = (\text{平均高程} - \text{最小高程}) / (\text{最大高程} - \text{最小高程}) \quad (1)$$

利用 Arcmap 空间分析模块中 zonal statistics 工具,可以快捷地提取不同分析窗口下 DEM 的最大值、最小值及平均值,然后根据式 (1) 进行栅格运算,求出到基于格网的 HI 值。

2.3 全局空间自相关

受构造运动、岩性差异的影响,HI 值变化明显。并且由于本研究没有利用流域作为单元计算 HI 值,在侵蚀地貌中,相近分析窗口的 HI 值也会表现出高值及低值 (图 2)。如果受到构造运动的强烈作用,

尽管局部会存在差异,HI 值将会呈现出高积分值与低积分值的集聚趋势^[24]。因此首先采用全局 Moran's 指数检测白龙江流域不同分析窗口下 HI 值分布是否存在空间自相关性。

该方法是基于 Pearson 相关系数的广义空间积差相关系数,通常用来描述某一现象在空间上的聚集状态和相关程度。全局 Moran's 指数统计量定义为^[26]

$$I = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad i \neq j \quad (2)$$

其中 n 表示研究空间区域的数目 (不同分析窗口下的格子数目), w_{ij} 为第 i, j 区域的空间权重系数,它反映第 i, j 区域在空间上的关系,如果第 i, j 区域相邻,则 $w_{ij} = 1$, 否则 $w_{ij} = 0$; x_i 与 x_j 为区域 i, j 的属性值, \bar{x} 为研究区域某现象 (HI 值) 的平均数。Moran's 指数的取值范围近似为 $[-1, 1]$ 之间,越接近 -1 则代表单元间的差异越大或分布越不集中,越接近 1 则代表单元间的关系越密切,性质越相似 (高值聚集或低值聚集),接近 0 则代表单元间不相关。对于全局 Moran's 指数,可以用标准化统计量 $Z(I)$ 来检验空间自相关的显著性水平。 $Z(I)$ 的计算公式为: $Z(I) = (I - E(I)) / \sqrt{\text{Var}(I)}$, $\text{Var}(I)$ 是 Moran 指数的理论方差, $E(I) = -1/(n-1)$, 为其理论期望。

2.4 局部空间关联

由于全局 Moran's 指数不能显示变量聚集的具体地理空间,为了探查白龙江流域面积高程积分值高聚集 (热点)、低聚集 (冷点) 区域分布,我们采用局部 Getis-Ord G_i^* 探测局部空间高值簇和低值簇。 G 系数一般采用距离权,要求空间单元的属性值为正,其计算公式为^[27]

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (3)$$

式中 d 为距离, $W_{ij}(d)$ 是 i, j 点之间的距离权。类似于全局 Moran 指数,也可对 G 系数进行标准化 $Z(G_i) = \frac{G_i - E(G_i)}{\sqrt{\text{Var}(G_i)}}$, 若 $Z(G_i)$ 显著为正,表明 i 单元

周围的值相对较高,属高值空间集聚 (热点区);反之,若 $Z(G_i)$ 显著为负,则表明 i 单元周围的值相对较低,属低值空间集聚 (冷点区)。

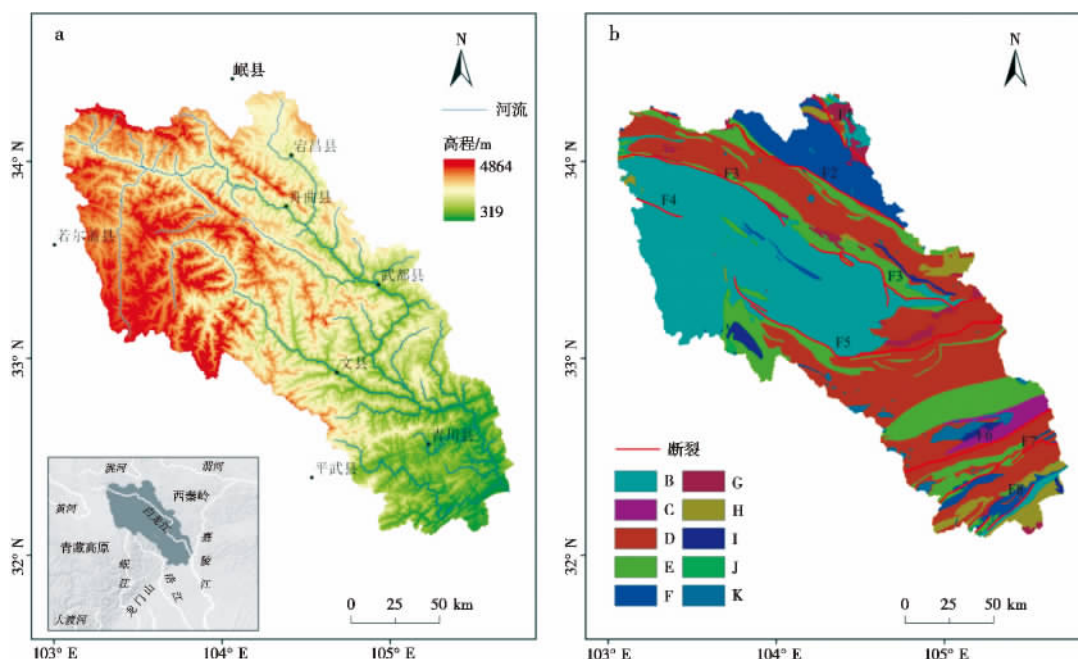


图1 研究区位置及水系(a)和构造简图(b)

Fig. 1 The location of study area and river system(a) and structure geology(b)

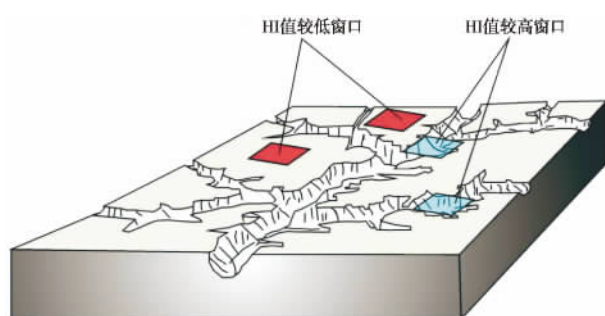


图2 HI值空间分布示意图^[25]

Fig. 2 Spatial distribution diagram of HI value^[25]

3 结果与讨论

3.1 白龙江流域 HI 值分布

我们以 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 作为初始分析窗口,为了分析 HI 值是否存在尺度依赖,并以 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 、 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 作为递增分析窗口。通过对 DEM 使用 Zonal statistics 工具提取了白龙江流域在不同分析窗口下的 HI 值,如图 3 所示。从图 3 中可知,不同分辨率、不同分析窗口下的 HI 值分布直方图均为正态分

布,并且平均值在 0.5 左右。在相同分析窗口、不同分辨率 DEM 下,HI 值分布特征仍存在相似性,但白龙江流域 HI 值并没有表现出较强的空间分布格局。

3.2 HI 值的空间依赖性

相关学者研究表明 HI 值存在空间分布特征,河流上游地势高差大,HI 值对构造运动的响应需要长时间的积累,河流下游高差小,较小的构造运动就会影响 HI 值^[2,10-12]。同样,分析窗口的位置与流域上下游位置的原理一样,也能反映高差及平均高程的变化。为了研究白龙江流域 HI 值的空间分布特征,分别计算了不同分辨率 DEM、不同分析窗口下起伏度及平均高程值,并分析了 HI 值与起伏度及平均高程值的关系,如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 中可知,不同分辨率不同分析窗口下,HI 值呈散点状集中分布在低值至中等值范围。当对地势起伏度以 100 m 高程间隔划分,分别求取不同高程间隔内的 HI 值平均值,图中白点所示,HI 平均值基本呈直线分布,即随着起伏度的增大,HI 平均值没有发生明显变化,表明 HI 值与起伏度值之间不存在依赖关系。Walcott 等^[17]在非洲东南部子流

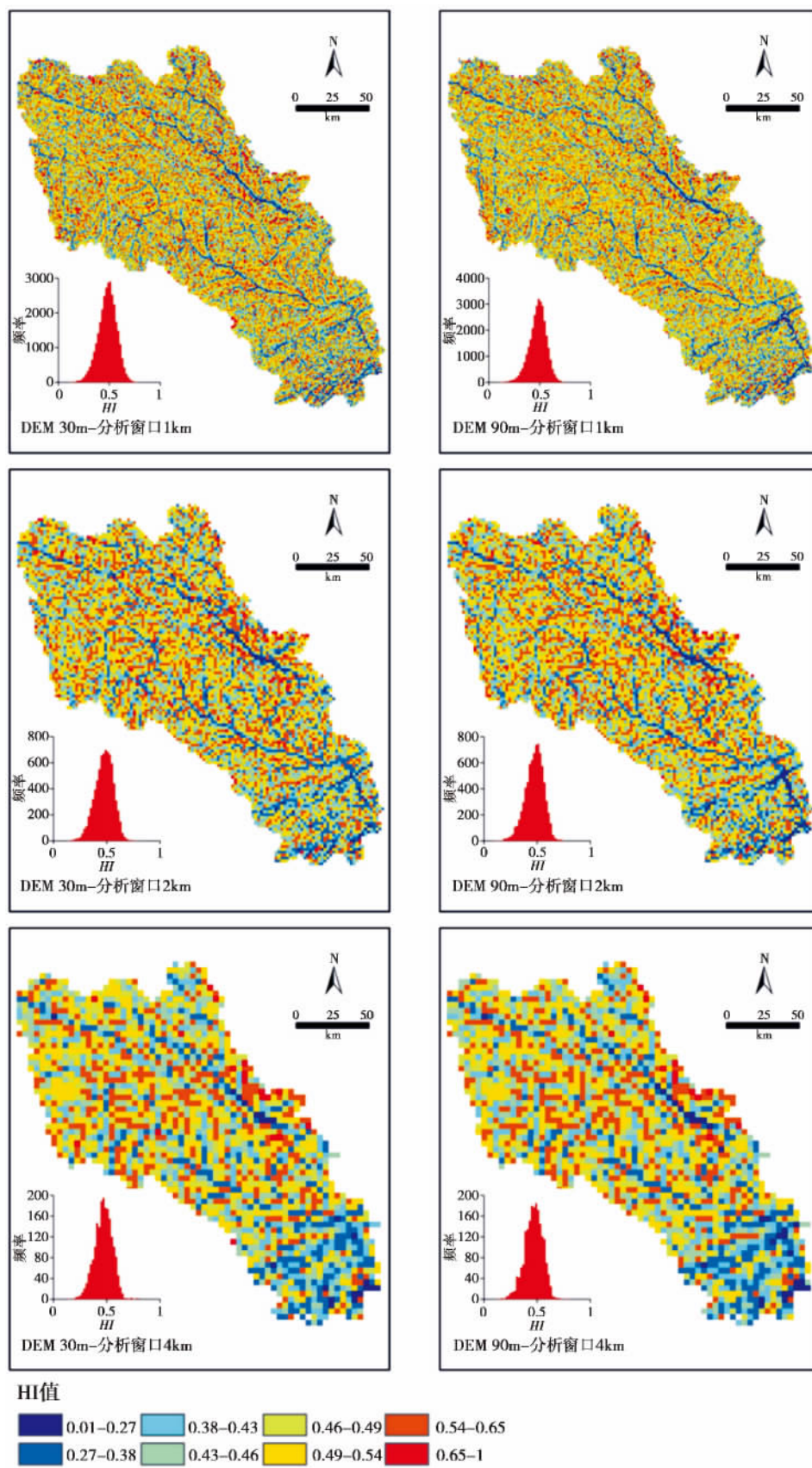


图3 白龙江流域不同分辨率、不同分析窗口下的 HI 值分布

Fig. 3 The distributions of HI value in different elevation models and different analysis grid sizes

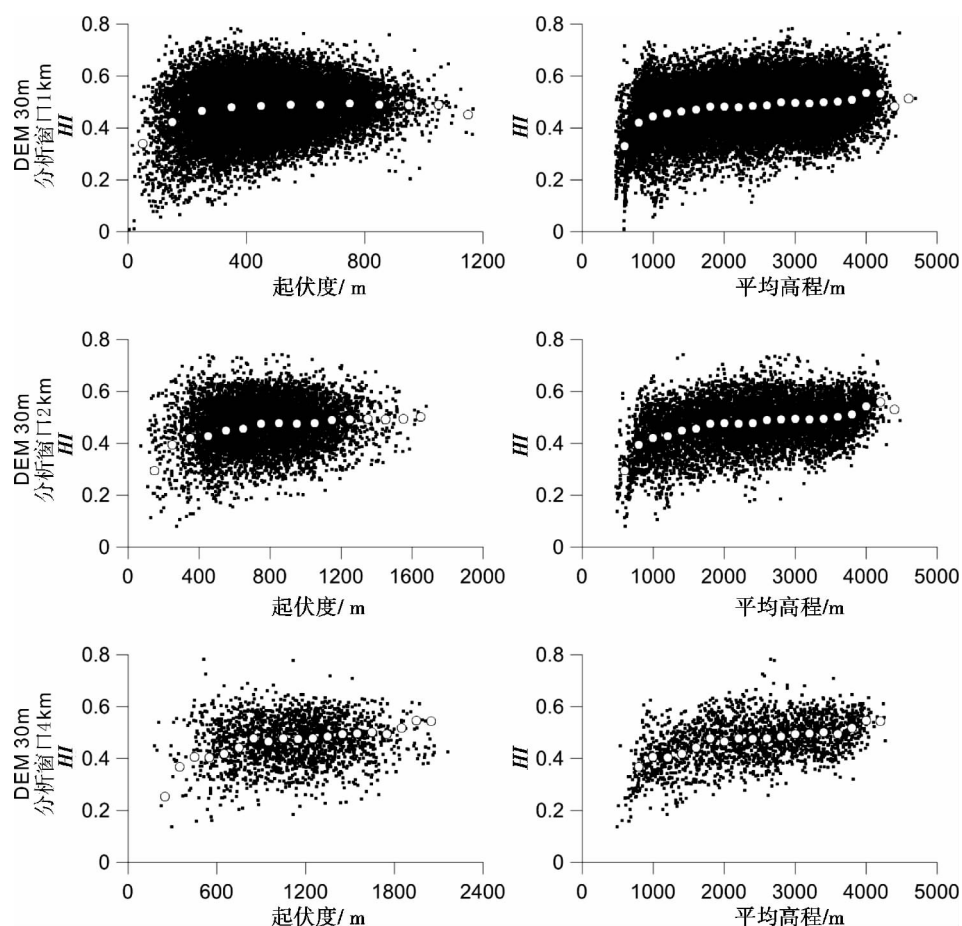


图4 不同分析窗口下面积高程积分与起伏度及平均高程的关系(30 m DEM)

Fig.4 HI values versus relief amplitude and versus mean altitudes based on 30 m DEM

域的研究结果也表明 HI 值不受起伏度值的影响。另外,以 200 m 间隔对平均高程划分(平均高程约为起伏度的 2 倍)统计不同高程区间的 HI 平均值,该值多分布在白龙江流域 HI 平均值 0.5 附近,表明 HI 值不受平均高程值的影响,该结果与 Perez-pena 及 Mahood 在 Genil 流域和兴都库什地区的研究^[24-25]相一致。以上分析表明白龙江流域 HI 值受起伏度值及平均高程值变化影响不大,即 HI 值与分析窗口的空间分布位置无关。

3.3 HI 值与岩性、气候、构造的关系

流域 HI 值的大小受岩性抗侵蚀强度的影响,一般抗侵蚀性强的流域, HI 值偏大^[4,6],反之则偏小。为了研究白龙江流域 HI 值与岩性差异之间的关系,我们这里采用了工程地质岩组的划分准则,并没有根据地层的时代的划分,因为同时代的地层可由不同成因的岩石类型组成,抗侵蚀强度并不一样,依据研究区内 1:50 万地质图划分得出了 10 种岩组(见图 1 b)。并选取 1 km × 1 km 的分析窗口,判断该

分析窗口大小内占主导岩性的比例,如图 6 a 所示,如果主导岩性比例大于 80%,则格子视为有效,反之,舍弃。通过判断,统计了不同岩组内 HI 值的平均值及标准差,从图 6 b 可以看出,不同岩组的 HI 平均值变化不大,但也存在异常,岩浆岩组主要岩石类型有花岗岩、闪长岩、橄榄岩,该岩组抗侵蚀强度大, HI 值反而低,粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩组抗侵蚀强度小, HI 值反而高,并且各岩组内 HI 值标准差范围均较大。表明岩性抗侵蚀强弱差异不足以解释 HI 值大小的不同。另外,白龙江流域相对于整个青藏高原而言,属于微观尺度水系系统,气候的变化差异不大,也不能作为影响 HI 值的主导因子。排除了岩性差异、气候变化因素的影响,可以确定构造运动是影响白龙江流域 HI 值大小的主导因素。

3.4 空间自相关分析

通过全局 Moran's 指数的计算,分析了白龙江流域 HI 值的空间自相关性,对于不同分辨率、不同分析窗口下的 HI 值均表现出了强的空间自相关性,

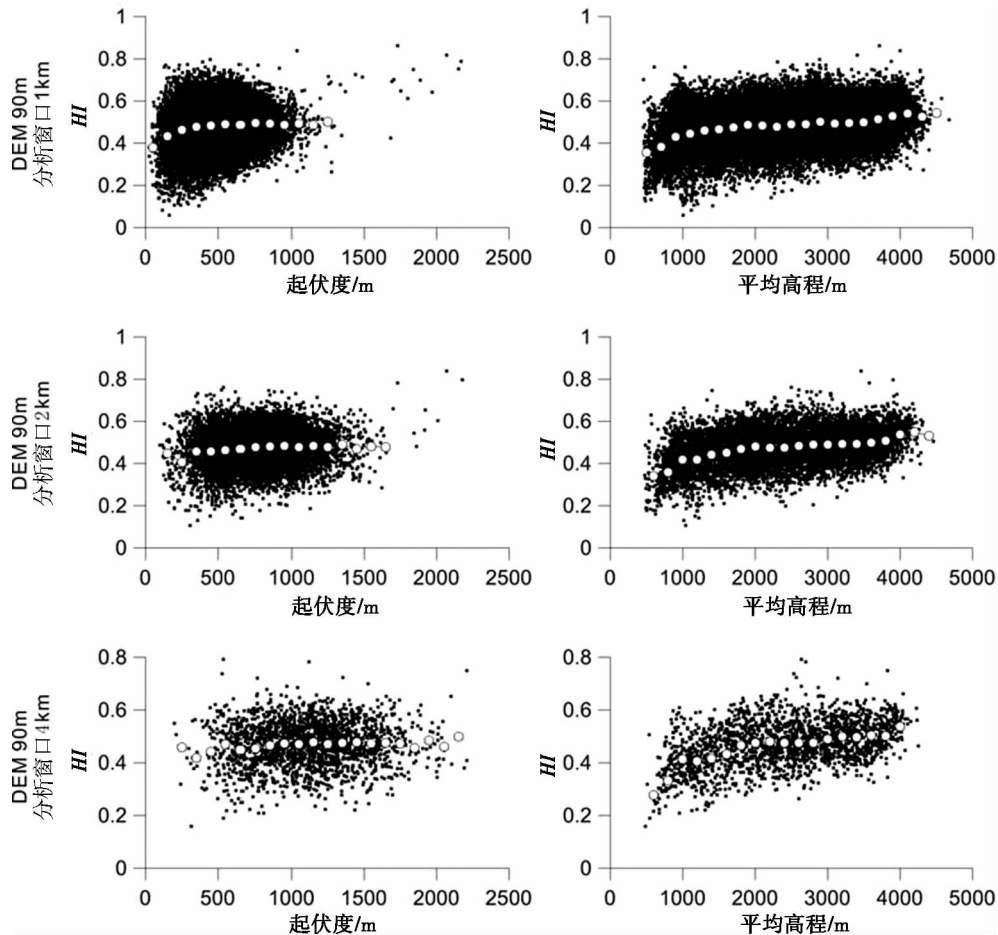


图5 不同分析窗口下面积高程积分与起伏度及平均高程的关系(90 m DEM)

Fig. 5 HI values versus relief amplitude and versus mean altitudes based on 90 m DEM

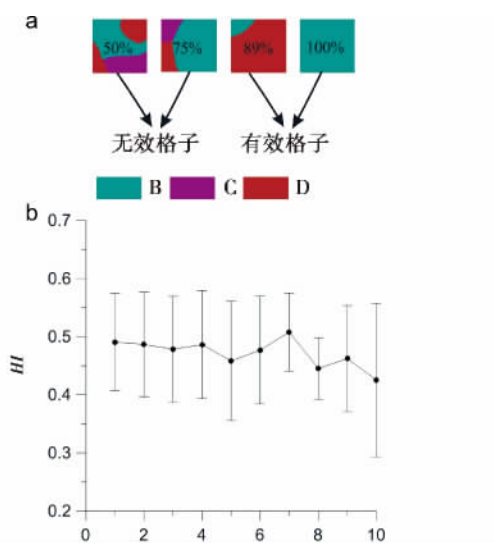


图6 a: 参与岩性统计的有效格子及无效格子示意图

b: 不同岩性的 HI 平均值及标准差

(1 至 10 编号分别对应 B 至 K 岩组)

Fig. 6 a: schematic showing the selection of valid cells

for the lithological analysis

b: mean HI values and standard deviations for each lithological group

如表 1 所示。I 值均为正,且大于 $E(I)$, Z 值均较高,表明 HI 值存在空间自相关性,在空间分布上存在集聚。为了确定 HI 值高值集聚及低值集聚的区域,采用了热点分^[27],经实验,确定 6 km 作为分析的距离阈值,热点分析结果如图 7 所示。另外, Z 值在不同分辨率 DEM 下均随着分析窗口的增大,值逐渐变小,表明 HI 值的自相关性存在尺度依赖;而不同分辨率同一分析窗口下 Z 值变化并不大(见表 1)。HI 值的热点分析结果同样具有在不同分辨率、同一分析窗口下所呈现的高值聚集区(热点)及低值聚集区(冷点)相似的规律(图 7)。而在同一分辨率下,随着分析窗口增大,热点及冷点的位置基本保持不变,只是其所表现的分辨率越来越低。综上可知,DEM 分辨率对 HI 值影响不大,但分析窗口的大小对 HI 值有显著影响,即 HI 值存在尺度依赖。究其原因,可能是较小的分析窗口,受坡地作用影响为主,HI 值增大;而较大的分析窗口,受河流作用影响为主,HI 值降低^[28]。这与前人的研究结果相一致^[17-28, 29]。

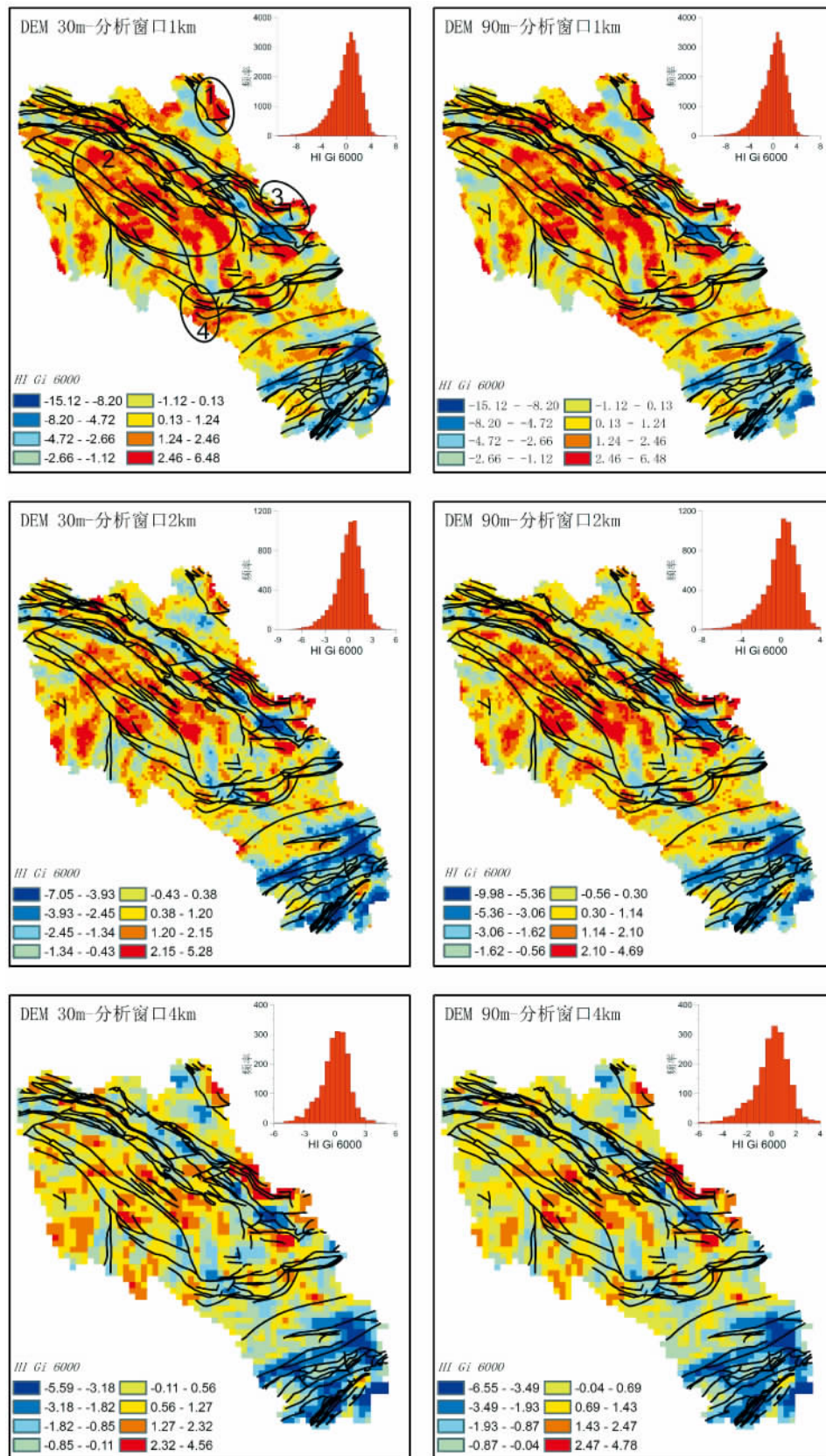


图7 不同分辨率、不同分析窗口下 HI 值 Getis – Ord 分析结果
(研究区 1:50 万地质图中所有断裂均标出)

Fig. 7 Getis – Ord statistic estimation for the HI value in different resolutions and different analysis window

表 1 不同分析尺度下 HI 值的 Moran's 指数及其 Z 值

Table 1 Results of the Global autocorrelation tests using the Moran Statistic for the Considered cases

DEM/m	分析窗口 / km	N	I	$E(I)$	Z	p
30	1	30 998	0.238 405	-0.000 032	58.983 945	0.000 001
30	2	7 757	0.176 370	-0.000 034	30.177 984	0.000 001
30	4	1 946	0.186 664	-0.000 514	11.443 641	0.000 001
90	1	30 998	0.263 904	-0.000 032	65.288 548	0.000 001
90	2	7 757	0.202 299	-0.000 129	34.611 791	0.000 001
90	4	1 946	0.216 572	-0.000 514	13.272 440	0.000 001

3.5 热点及冷点反映的构造运动信息

图 7 中编号 1~3 为高值聚集区域,位于白龙江流域中上游,其分布与 NW-SE 走向 F1~F5 断裂大体一致,该地区地壳活动性明显且突出,断裂活跃,历史上发生过许多大的地震(图 8),如 1879 年武都-文县 8.0 级特大地震,并且近期进入了快速隆升阶段^[22]。袁道阳等^[31]根据东昆仑断裂与西秦岭断裂的滑动速率差异估计迭部-白龙江断裂带 F3 的走滑速率为 5.0 mm/a,临潭-宕昌断裂带 F1 的走滑速率为 2.0~2.5 mm/a,虽然对这一滑动速率仍有争议^[32],但 F1~F3 为东昆仑断裂向西秦岭北缘断裂的过渡的转换变形区域,对东昆仑和西秦岭断裂之间的运动变形起到吸收和转换作用是无可争议的。 HI 高值聚集区域 4 位于文县断裂 F5 附近,该断裂全新世具有较强的活动性^[33],并且在

上游也发育大量河流阶地,而构造运动是造成阶地发育的主要原因^[34-35]。另外,高值聚集区域 2 和 4 也可能受到第四纪岷山快速隆起过程向北延伸效应^[36]的影响。低值聚集区主要分布在白龙江流域下游(区域 5)及一些河谷中,地貌差异不明显,受构造抬升作用的影响较弱^[37],该特征可能来源于岷山隆起所造成的屏蔽作用^[38-39]。

4 结论

本研究在求取面积高程积分时,没有采用传统的以流域作为载体的方法,而是采用不同大小的分析窗口,并把在遥感科学、生态环境、社会科学中广泛应用的 Moran's 指数、Getis-Ord G_i^* 指数应用到面积高程积分中,对白龙江流域面积高程积分值进行高值聚集及低值聚集划分,初步得出以下结论:

1. 白龙江流域 HI 值受 DEM 空间分辨率、岩性差异的影响不大,并且与分析窗口空间分布位置无关,但 HI 值存在尺度依赖,受分析窗口尺度的影响。
2. 全局 Moran's 指数的分析表明原始 HI 值存在空间自相关性,而“热点分析”表明 HI 值高值聚集区分布在白龙江中上游,与地壳隆升强烈及断裂活跃的作用相关,低值聚集区分布在白龙江下游及一些河谷中,受构造抬升作用影响较弱。

参考文献(References)

[1] Keller E A, Pinter N. Active tectonics: earthquakes, uplift and landscape(2nd ed.). [M]. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002: 362
[2] Chen Y C, Sung Q C, Cheng K Y. Along-strike variations of morpho-tectonic features in the western foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream gradient and hypsometric analysis [J]. Geomorphology, 2003, 56: 109-137
[3] Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system(Sichuan, China) and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 126-135 [张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意

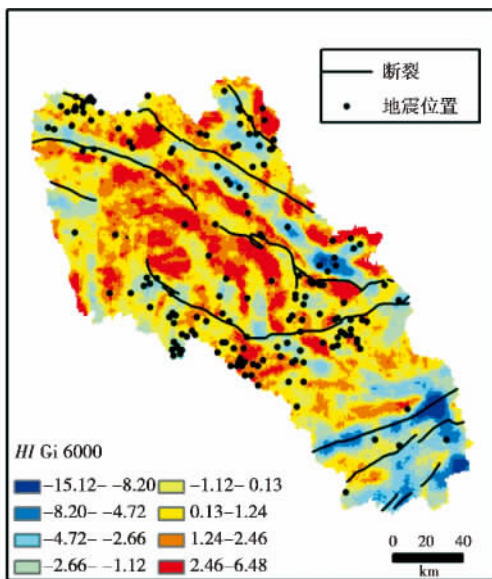


图 8 研究区历史发生的地震位置分布图($M_s > 3$)
时间: 公元前 1831—2008 年, “5·12”汶川地震后该地区发生的余震并未统计, 地震数据来源: 地震数据服务网, 《中国地震目录》^[30])

Fig. 8 Locations of earthquake in the study area($M_s > 3$)

- 义[J]. 第四纪研究 2006 26(1):126-135]
- [4] Hamdouni E I, Irigaray C. Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (Southern Spain) [J]. Geomorphology 2008 96:150-173
- [5] Font M, Amorese D. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France) [J]. Geomorphology 2010 119(3-4):172-180
- [6] Gao M X, Zeilinger G, Xu X W, et al. DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China [J]. Geomorphology 2013, 190(15):61-72
- [7] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography [J]. Bulletin of the Geological Society of America 1952, 6:1117-1142
- [8] Ohmori H. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation [J]. Geomorphology 1993 8:263-277
- [9] Brocklehurst S H, Whipple K X. Hypsometry of glaciated landscapes [J]. Earth Surface Processes and Landforms 2004 29:907-926
- [10] Zhang Jingchun, Li Chuanchuan, Zhang Mei, et al. Geomorphologic analysis of the Golmud river Drainage Basin based on Hypsometric Integral Value [J]. Mountain Research 2011 29(3):257-268 [张敬春, 李川川, 张梅, 等. 格尔木河流域面积-高程积分值的地貌学分析[J]. 山地学报 2011 29(3):257-268]
- [11] Lifton N A, Chase C G. Tectonic, climatic and lithologic influence on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California [J]. Geomorphology 1992 5:77-114
- [12] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications [J]. Geographical Research 2010 29(2):271-282 [赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J]. 地理研究 2010 29(2):271-282]
- [13] Wang Lin, He Zhongtai, Ma Baoqi. Geomorphic evolution and its implication for the fault activity in the daihai drainage basin [J]. Quaternary Sciences 2008 28(2):310-318 [王林, 何仲太, 马保起. 岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义[J]. 第四纪研究 2008 28(2):310-318]
- [14] Li Libo, Xu Gang, Hu Jianmin, et al. Quantitative analysis of relative active tectonics of the upstream region of Weihe river based on DEM [J]. Quaternary Sciences 2011 32(5):866-879 [李利波, 徐刚, 胡健民. 基于DEM渭河上游流域的活动构造量化分析[J]. 第四纪研究 2012 32(5):866-879]
- [15] Ansan V, Mangold N. New observations of Warrego Valles, Mars: evidence for precipitation and surface runoff [J]. Planetary and Space Science 2006 54:219-242
- [16] Korup O, Schmidt J, M€savenecy M J. Regional relief characteristics and denudation pattern of the western southern Alps, New Zealand [J]. Geomorphology 2005 71:402-423
- [17] Walcott R C, Summerfield M A. Scale dependence of hypsometric integrals: An analysis of southeast African basin [J]. Geomorphology 2008 96:174-186
- [18] Cheng K Y, Hung J H, Chang H C, et al. Scale independence of basin hypsometry and steady state topography [J]. Geomorphology 2012 171-172:1-11
- [19] Zhang Maosheng, Li Zhiheng, Wang Genlong, et al. The geological hazard characteristics and exploration ideas of the Bailong River Basin [J]. Northwestern Geology 2011 44(3):1-9 [张茂省, 黎志恒, 王根龙, 等. 白龙江流域地质灾害特征及勘查思路[J]. 西北地质, 2011 44(3):1-9]
- [20] Li Jijun, Fang Xiaomi, Pan Baotian, et al. Late cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area [J]. Quaternary Sciences 2001 21(5):2-12 [李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究 2001 21(5):2-12]
- [21] Zhang Yueqiao, Yang Nong, Chen Wen, et al. Late cenozoic tectonic deformation history of the east-west geomorphological boundary zone of china and uplift process of the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers 2003 10(4):599-612 [张岳桥, 杨农, 陈文, 等. 中国东西部地貌边界带晚新生代构造变形历史与青藏高原东缘隆升过程初步研究[J]. 地学前缘, 2003 10(4):599-612]
- [22] Zhan Wenwu. The research of engineering geological problems in the section of gansu province of Lanzhou-Haikou highway [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press 2006:8-44 [谯文武. 兰州-海口高速公路甘肃段工程地质问题研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社 2006:8-44]
- [23] Pike, Wilson. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis [J]. Geological Society of America Bulletin 1971 82:1079-1084
- [24] Perez-pena J V, Azanon J M, Booth R G, et al. Differentiating geology and tectonics using a spatial autocorrelation technique for the hypsometric integral [J]. Journal of Geophysical Research 2009, 114:F02018
- [25] Mahmood S A. Analyzing spatial autocorrelation for the hypsometric integral to discriminate neotectonics and lithologies using DEMs and GIS [J]. GIScience & Remote Sensing 2011 48(4):541-565
- [26] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena [J]. Biometrika 1950 37:17-23
- [27] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application [J]. Geographical Analysis 1995, 27(4):286-306
- [28] Hurtrez J E, Lucazeau F. Effects of drainage area on hypsometry from an analysis of small-scale drainage basins in the Siwalik Hills (central Nepal) [J]. Earth Surface Processes Landforms 1999, 24:799-808
- [29] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Ma Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implication in the Loess Plateau, China [J]. Mountain Research 2008 26(3):356-363 [信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义[J]. 山地学报 2008 26(3):356-363]
- [30] Gu Gongxu. Catalogue of Chinese earthquake. Beijing: Science Press 1983:778-824 [顾功叙. 中国地震目录[M]. 北京: 科

- 学出版社,1983:778-824]
- [31] Yuan Daoyang ,Zhang Peizhen ,Liu Baichi et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai - Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica 2004 ,78(2) :270-278 [袁道阳 ,张培震 ,刘百篪 ,等.2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报 2008 ,78(2) :270-278]
- [32] Yu Jingxing ,Zheng Wenjun ,Yuan Daoyang ,et al. Late Quaternary active characteristics and slip-rate of pingding-huama fault ,the eastern segment of Guanggaishan - Dieshan fault zone(west Qinling mountain) [J]. Quaternary Sciences 2012 ,32(5) :957-967 [俞晶生 ,郑文俊 ,袁道阳 ,等. 西秦岭西段光盖山 - 迭山断裂带坪定 - 化马断裂的新活动性与滑动速率[J]. 第四纪研究 2012 ,32(5) :957-967]
- [33] Lu Haifeng ,Ma Baoqi ,Liu Guangxun. Characteristics of the neotectonic movement of the NEE - striking fault belt north of Wen County ,Gansu[J]. Journal of Seismological Research 2006 29(2) :143-146 [卢海峰 ,马保起 ,刘光勋. 甘肃文县北部北东向断裂带新构造活动特征[J]. 地震研究 2006 29(2) :143-146]
- [34] Guo Jinjing ,Han Wenfeng ,Liang Shouyun ,et al. Study and comparison on the terrance of Taohe River and Minjiang River in Minxian - Dangchang area of the western Qinling[J]. Geology Survey and Research 2006 29(4) :271-278 [郭进京 ,韩文峰 ,梁收运 ,等. 西秦岭岷县 - 宕昌地区洮河和岷江阶地特征对比分析[J]. 地质调查与研究 2006 29(4) :271-278]
- [35] Guo Jinjing ,Han Wenfeng ,Liang Shouyun ,et al. Tectonic-morphological evolution of the Minxian - Wudu area on the northeastern margin of the Qinghai - Tibet Plateau and plateau uplift[J]. Geology in China 2006 ,33(2) :383-392 [郭进京 ,韩文峰 ,梁收运. 青藏高原东北缘岷县 - 武都地区构造地貌演化与高原隆升[J]. 中国地质 2006 ,33(2) :383-392]
- [36] Zhang Huiping ,Zhang Peizhen ,Yuan Daoyang ,et al. Differential landscape development of the central N - S seismic zone and its relation to the west Qinling tectonic belt [J]. Quaternary Science , 2010 ,30(4) :803-811 [张会平 ,张培震 ,袁道阳 ,等. 南北地震带中段地貌发育差异性及其与西秦岭构造带关系初探[J]. 第四纪研究 2010 ,30(4) :803-811]
- [37] Li Zhiwu ,Liu Shugen ,Chen Hongde ,et al. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt ,West Sichuan ,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition 2008 ,35(4) :440-454 [李智武 ,刘树根 ,陈洪德 ,等. 龙门山冲断带分段 - 分带构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版 2008 ,35(4) :440-454]
- [38] Deng Qidong ,Chen Shefa ,Zhao Xiaolin. Tectonics ,seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. Seismology and Geology ,1994 ,16(4) :389-403 [邓起东 ,陈社发 ,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质 1994 ,16(4) :389-403]
- [39] Li Chuanyou ,Song Fangmin ,Ran Yongkang. Late quaternary activity and age constraint of the northern longmenshan fault zone [J]. Seismology and Geology 2004 ,26(2) :248-257 [李传友 ,宋方敏 ,冉永康. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质 2004 26(2) :248-257]

The Technique of Spatial Autocorrelation for the Hypsometric Integral

CHANG Zhiyang¹ ,WANG Jian^{1 2} ,BAI Shibiao^{1 2} ,ZHANG Zhigang¹

(1. School of Geography Science ,Nanjing Normal University ,Nanjing 210046 , Jiangsu ,China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment(Ministry of Education) ,Nanjing Normal University ,Nanjing 210046 , Jiangsu ,China)

Abstract: Hypsometric integral has been widely used in Geomorphology study as an index to depict the recent and active structures for its sensitivity to the influence of tectonic and different lithology. The traditional methods to study HI often use drainage basins ,this may be dependent of basin geometry and drainage area. To avoid this influence ,we calculate HIs using two digital elevation models of 30 and 90 m of pixels resolution in Bailongjiang basin of western China(Gansu ,Sichuan) . The relations between relief amplitude ,mean elevation and HI are also analyzed in different analysis window. Meanwhile ,we applied spatial pattern analysis using Global Moran's index and Getis - Ord Gi* index to measure the spatial autocorrelation of HI and the distribution of hot spots. It can be concluded that spatial distributions of HI do not show clear spatial patterns and correlation with mean elevation and relief amplitude. HI are independent on the resolution of DEM and lithology but are scale influenced. The hot spots define the uplift of crust and active faults in the upstream of Bailongjiang basin ,the cold spots define the downstream of bailongjiang and some river valley regions.

Key words: Hypsometric integral; Digital elevation model; tectonic activity; Bailongjiang