

黄土地区地表形态指数的构建与实现

李瑞娥¹, 王娟娟¹, 谢永利², 张小荣²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了研究黄土地区地表高低起伏、破碎程度, 选取坡度、海拔高程、地表粗糙度、地表切割深度等单因素指标来综合量化地表形态指数。通过地理信息技术平台, 以黄土地区数字高程模型和相关数据库为基础, 进行了单因素指标的计算和提取, 建立了地表形态指数的计算公式, 实现了黄土地区地表形态指数的计算, 得到了地表形态分布图。结果表明: 黄土地区地表形态指数存在明显的空间分异规律, 能够客观、准确地反映黄土地区地表形态状况, 为公路建设、土地规划等研究提供依据。

关键词: 地表形态指数; 黄土地区; 地理信息系统; 地表粗糙度; 切割深度

中图分类号: U412

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0229-06

Construction and implementation of surface morphology index in loess area

LI Ruie¹, WANG Juanjuan¹, XIE Yongli², ZHANG Xiaorong²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Highway college, Chang'an University Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the surface relief and broken degree of surface, the factors such as slope, altitude, land surface roughness and surface incision are selected to quantify the surface morphology index comprehensively. Based on the Digital Elevation Model and related database, the calculation and extraction of single elements are finished by using GIS. The formula of surface morphology index is elaborated to finish the calculation in the loess area, and the map of surface morphology index is obtained. The calculation results indicate that a highly spatial heterogeneity exists in the loess area and it objectively shows the surface morphology condition, which provide the a basis for highway construction and land division.

Key words: surface morphology index; loess area; GIS; surface roughness; surface incision

地形是地球表面起伏状态的外部特征, 可用高程、坡度、坡向等几何要素表征。地形的研究不仅是地球科学等基础学科的一个经典课题, 也是道路工程、岩土工程、城乡规划、水土保持、工程地质、水文地质等学科研究的共同课题之一^[1-6]。目前国内外学者们针对于地表形态的影响因素、量化、计算精度、可靠性及其在公路自然区划、水文区划中的应用等开展了大量的相关研究^[7-15], 并取得了相应的研究成果。

黄土地区地形破碎、沟壑纵横、土性复杂, 复杂的地形地貌增加了公路工程建设的难度和产生公路边坡变形的因素和条件, 在相当程度上影响了公路工程的规划、设计、建设和维护。可见, 地形地貌条件成为黄土地区公路工程建设不可回避的问题。鉴于此, 有必要对黄土地区地表形态进行科学、合理的划分, 用综合的定量化指标进行评

价, 基于此本文建立以定量化指标—地表形态指数来综合评价黄土地区地表形态状况, 并借助地理信息技术平台, 实现了在全区范围内的计算, 为该区公路路网的设计、公路自然区划、土地资源规划等提供数据支撑。

1 研究区域与数据

我国黄土主要分布于黄土高原地区, 该地区黄土分布广、厚度大、地层全、古土壤清晰是世界上黄土的典型分布区。黄土高原西起乌鞘岭, 东至太行山, 南起秦岭、伏牛山, 北达长城沿线, 包括了陕西、河南、陕西、甘肃、青海等地区, 以黄土集中分布区为研究区域。计算中以地理信息系统(GIS)为技术平台, 利用中国 1:25 万数字高程模型和 1:25 万地理信息数据库, 通过计算得到黄土地区公路地表形态指数分区图。

收稿日期: 2014-4-24 修改稿日期: 2015-4-15

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0889); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116120120006)

作者简介: 李瑞娥(1979-), 女, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程研究。E-mail: liruie05@163.com

2 地表形态指数影响因素的构建与实现

地形是指地表的外形或者轮廓,一般采用几何要素,如长、宽、高、深、海拔高程、坡度、坡形、坡向坡长等示量^[16-17]。地理学中对地形的分类主要依据海拔高程并参考相对高程,例如山地、高原、平原、盆地、丘陵等。由于学科研究侧重不同,关注的内容就有所差异。对于公路工程而言,由于地形对公路的选线、勘测、造价、施工、养护、边坡的稳定性等都有重要的影响,所以根据公路工程特点和需要出发选择地表形态指数的计算要素。

在黄土地区,影响地表形态的因素众多,仅依靠单因素进行地表形态的分析不能很好反映其对公路建设的影响,还使研究精度大大降低,甚至出现失真情况。因此,选择既能体现对公路建设的显著影响又便于分析和计算的多因素作为计算要素是此次研究的重要内容。在众多影响因素中,地表坡向、坡型由于情况复杂多变,难于实现量化研究。沟谷密度是研究黄土地区地表形态至关重要的影响因素,但由于本次计算使用的比例尺较小,沟谷密度区域变化规律性差,故此次计算剔除该影响因素,采用坡度、海拔高程、地表粗糙度、切割深度来反映地表形态。

2.1 坡度

坡度既是表征地球表面形态的最基本指标,对公路建设的各方面都产生直接或间接的影响,坡度是公路建设中敏感的自然环境参数之一。虽然地表坡长、坡向、坡形和相对高程等也是表征地表形态的指标,但仅在局域地形上有意义,而在区域上就不如坡度与海拔高程能说明问题^[7]。在黄土地区,在流水侵蚀和其他地貌营力的作用下形成了沟谷纵横、沟深坡陡、地表支离破碎的黄土冲沟和黄土塬、黄土梁峁等地貌。黄土塬是黄土地区流水侵蚀残留的地表平坦的高平面,我国典型的黄土塬有洛河的洛川塬、泾河的董志塬等,坡度一般在 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$,横剖面略呈穹状的黄土梁坡度多在 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$,地表侵蚀相对较弱,适宜公路建设,对运输车辆影响不大。黄土峁多呈黄土丘状,平面上多为椭圆或圆形,黄土梁多呈凸形坡,坡度多在 20° 左右,地表侵蚀强烈,造成各种地质灾害增多,公路建设难度增加,投资费用增高。所以地面坡度对于黄土地区公路建设具有非常重要的意义,在此即以坡度作为地表形

态指数的计算要素。

坡度是通过某点的切平面与水平地面的夹角,是高度变化的最大值比率,表示地面在该点的倾斜程度。本次坡度的计算,在格网 DEM 中采用开窗连续移动搜索的方法来完成整个图幅的计算工作,在 ArcGIS 中利用空间分析中的 GRID 模块中的 SLOPE 命令计算得到研究区的坡度,获得研究区的坡度分布图。

2.2 海拔高程

海拔高程是指从地面点沿重力线到大地水准面的距离,是描述地形地貌基本形态特征的重要指标之一。海拔高程的不同对公路工程建设会产生不同程度的直接或间接影响,高海拔地区由于低温、缺氧不但增加了公路建设的难度,而且会产生各种公路病害,给车辆运营也带来许多不利影响。黄土分布区海拔高程有如下特点^[18]:以六盘山为界,在其以西地区海拔普遍在 $1\,500\sim 2\,000\text{ m}$ 左右,在这部以分地区华家岭为界又可以分为南北两个部分,华家岭以南地区海拔高程为 $1\,500\sim 1\,600\text{ m}$,华家岭以北地区海拔高程多在海拔 $1\,800\sim 2\,000\text{ m}$ 以上。在六盘山以东至吕梁山以西地区海拔高程大致可以分为三个阶梯,其界限是子午岭和渭北山地。第一个阶梯是海拔高程在 $1\,300\sim 1\,900\text{ m}$ 的子午岭以北地区,第二个阶梯为子午岭至渭北山地,主要分布有洛川塬和董志塬,洛川塬海拔为 $1\,100\sim 1\,200\text{ m}$,董志塬海拔高程为 $1\,300\sim 1\,400\text{ m}$,第三个阶梯为渭北山地以南的广大地区,海拔高程不超过 $1\,000\text{ m}$ 。海拔高程表征和反映对地表形态对公路工程建设的影响是一个相对宏观的概念,在实际工作中,海拔高程对公路工程建设的影响是极为复杂的。虽然将海拔高程进行相应分级,不可能全部反映黄土地区公路建设的实际情况,但是从公路自然分区的角度来讲,选择海拔高程作为反映地表形态指数的计算要素,仍然是一种较为有效的方法和手段,具有总体与宏观统领的作用。

地面点高程的定义是指在垂线方向上地面点到大地水准面之间的距离。作为地形表面最基本的属性—高程,是高出陆地地貌发育的最终基准的高度,反映了地形起伏状态和地表物质的势能。在地形模型上,采样点和格网点的高程可直接获取,但是其他任意点的高程却是要通过内插法获得。数字地面模型数据结构的不同导致高程内插的算法的

不同,主要有不规则三角网 TIN、格网 DEM 和等高线模型上点的高程内插计算^[19]. 在 ArcGIS 中基于格网单元的 DEM 其海拔高程可以从网格单元直接提取计算.

2.3 地表粗糙度

地表面粗糙度是用来描述和反映地表较大区域范围内的宏观特征的参数^[20],在较大区域内的地形分析应用较多,而在小区域内的地形分析并不具备任何地理意义和应用意义. 在土壤侵蚀特征、地貌分类、地表发育、水土保持等研究都具有的宏观尺度上的理论意义. 黄土高原地区的公路建设往往要高填深挖筑基,越源避梁掘洞、跨河互通架桥等,表征地表起伏变化的地表粗糙度能够较好反映地表形态状况和地形起伏变化,对公路跨越的地貌单元进行较好的区分,故在此选择地表粗糙度作为地表形态指数的计算要素.

地表粗糙度作为反映地表形态的宏观指标之一,刻画了区域范围内一个单位地表面元的地势起伏的复杂程度,从宏观上描述了地形曲面特征,一定程度上反映了地质构造运动的幅度. 地面粗糙度是在特定区域内地表面积与其投影面积的比值,或者为某点坡度的余弦的倒数. 假设地形曲面为 $f(x,y)$, 研究范围为区域 D , 区域 D 的投影面积 S 与表面积 S_s 的比值即为粗糙度 K_r , 可用下式来表示:

$$K_r = \frac{S_s}{S} = \frac{\iint_D (1 + f_x^2 + f_y^2)^{\frac{1}{2}} dx dy}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \sec \beta_i}{\sum_{i=1}^n S_{ii}} \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出 K_r 值如果越大,那么地表就越粗糙, K_r 值越小,那么地表就越平坦. 根据上述定义,倾角不同的平面,其倾角不同因而投影面积也会不同,这显然不妥. 所以在实际应用中,计算正方形格网的粗糙度时,地表粗糙度是以格网顶点空间角线的中点距离 D 来表示,其计算公式为:

$$D = \left| (Z_{i+1,j+1} - Z_{i,j}) / 2 - (Z_{i,j+1} - Z_{i+1,j}) / 2 \right|$$

$$= \frac{1}{2} |Z_{i+1,j+1} - Z_{i,j} - Z_{i,j+1} + Z_{i+1,j}| \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出 D 越大,那么 4 个顶点的起伏变化就会越大,相应的地形表面就越粗糙,反之,地形表面越平坦. 而对于三角形的格网,其粗

糙度是指该顶点的高程与相邻点高程差的绝对值之和除以该顶点相邻顶点的个数^[21]. 按照上述方法,从 DEM 中提取地表粗糙度,在此基础上依据不同地表粗糙度对地表形态指数的影响程度进行等级划分,对地表粗糙度进行分级,得到地表粗糙度分级图.

2.4 切割深度

由于地表破碎程度对黄土地区公路线路的布置,构造物的选取、公路工程施工、养护,公路病害的产生以及公路工程投资等都具有一定得直接或间接的影响. 作为另外一个反映地表破碎程度的重要因子—地形切割深度,也是反映地表形态的重要因素. 在黄土高原地区由于流水的侵蚀作用形成深度大小不等的冲沟,冲沟深度从数米到数百米,且规模和面积都较大,密布的冲沟及其支沟将地表等切割成残丘状,为通过该区的公路建设增加了难度. 一般而言,黄土高原地区被沟谷蚕蚀的面积已经达到黄土覆盖面积的一半,黄河流域面积与沟谷面积之比均多大于 25%,最大可达 56.7%,该区主干沟谷的切割深度在 200~300 m. 由于流水的侵蚀作用使黄土高原地表支离破碎,沟谷狭深,沟坡陡峭不稳、沟头溯源侵蚀强烈,给公路建设带来极大的困难和不便. 故在此采用反映地表破碎程度和地表形态状况的切割深度作为地表形态指数的计算要素.

地形切割深度是在一定区域范围内的平均高程与最小高程的差值. 在 ArcGIS 中切割深度的提取是利用 ArcGIS 的 GRID 模块,采用移动窗口分析法来进行计算的. 作为栅格数据分析的一种基本方法,移动窗口分析法是针对栅格数据系统中的一个、多个栅格点或全部数据,开辟一个具有固定分析半径的窗口 (分析半径指矩形移动窗口的边长),并在该分析窗口内进行极值、差值、均值等一系列统计计算,或者对其他层面的信息进行必要的复合,以达到实现栅格数据有效的水平方向扩展分析^[22]. 对于 DEM 数据,开辟半径为 5 km 的移动分析窗口,首先求取 5 km 分析窗口内的平均高差,那么目标栅格的切割深度就是用此平均高差减去窗口内的最小高程,以此方法对整幅图求取高差,便得到了整个研究区切割深度的栅格图,用公式表示如下:

$$H = \bar{h}_{ij} - h_{ij \min} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: H 为地形起伏度, $\overline{h_{ij}}$ 为分析窗口内平均高程值, $h_{j\min}$ 为分析窗口内最小高程值。

在地理信息平台上, 对于上述算法 GRID 模块利用了 FOCALRANGE 函数来实现. 在此基础上依据不同切割深度对地表形态指数的影响程度进行等级划分, 对切割深度进行分级, 得到切割深度分级图。

3 地表形态指数的计算

3.1 计算要素公度

表 1 地表形态指数计算要素分值表
Tab. 1 The scale score of calculation factors for surface morphology index

计算要素	标度等级与标度分值				
	无影响 0	轻度影响 1	中度影响 3	严重影响 6	极严重影响 10
坡度/°	≤3	6	6~10	10~20	>20
海拔高程/m	500	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000	>2 000
地表粗糙度	<1.01	1.02	1.03	1.04	>1.04
切割深度 /m	<50	50~100	100~200	200~300	>300

3.2 计算要素的权重计算

地表形态指数的各计算要素对地表形态指数的影响是不同的, 为了更准确、真实地反映七对地表形态指数的综合影响情况, 就需对每个计算要素赋予权重. 本文权重的确定采取 AHP (层次分析法) 法, 避免了专家打分法受主观因素影响太大的影响。

层次分析法是处理多目标、多准则、多因素、多层次的复杂问题, 进行决策分析、综合评价的一种简单、实用而有效的方法. 层次分析法首先要将所要分析的问题层次化, 根据问题的性质和要达到的总目标, 将问题分解成不同的组成因素, 按照因素间的相互关系及隶属关系, 将因素按不同层次聚集组合, 形成一个多层分析结构模型, 最终归结为最低层 (方案、措施、指标等) 相对于最高层 (总目标) 相对重要程度的权值或相对优劣次序的问题。

请 30 位专家根据判断规则逐层写出比较判断矩阵, 然后对个体判断矩阵中的偏激判断信息进行有效剔除, 然后再综合成如下群体判断矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0.95 & 0.68 & 0.65 \\ 1.05 & 1 & 0.70 & 0.54 \\ 1.47 & 1.43 & 1 & 0.93 \\ 1.54 & 1.60 & 1.70 & 1 \end{bmatrix}$$

上述分析将地表形态指数通过坡度、海拔高程、地表粗糙度、切割深度等几个计算要素来确定. 由于以上各计算要素的性质不同, 内容不同、量纲也不同, 对公路工程建设的影响程度不同, 所以要将其放在同一平台—地理信息系统中进行计算, 前提就是对各计算要素进行量化处理, 使其能够在同一平台上直接进行运算. 基于以上的目的, 按照各计算要素对公路工程建设影响程度的不同, 参考文献[7、8、10] 中的标度分值, 表 1 将 4 个计算要素的计算结果分为 5 个级别, 并对每一级赋予分值。

根据综合判断矩阵, 利用和积法就可以计算该矩阵的最大特征值 λ_{\max} 及相应标准化特征向量 W . 通过计算得到标准化特征向量为

$$W = [0.191 \ 0.188 \ 0.280 \ 0.341]^T$$

最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.016$, 通过一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.016 - 4}{4 - 1} = 0.005, \text{ 对于 4 阶矩阵}$$

根据“1~9 阶矩阵的平均随机一致性指标表”得到 $RI=0.90$ 。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.005}{0.90} = 0.01 < 0.10$$

根据层次分析法原理可知, 当 $CR<0.10$ 时即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权重分配是合理的, 即地表形态指数的计算要素权重分配为表 2 所示:

表 2 地表形态计算要素权重表
Tab.2 Weight of calculation factors of surface morphology

影响因素	地表坡度	海拔高程	地表粗糙度	切割深度
权重	0.191	0.188	0.280	0.341

3.3 地表形态指数计算

根据前述影响地表形态指数的计算要素, 根据不可公度原理, 建立地表形态指数计算公式如下:

$$D_i = \sum_{l=1}^4 M_{il} \cdot K_l$$

式中: D_i 为分区计算单元的地表形态指数; i 为计算单元数; M_{il} 为分区计算单元内四个影响要素的标度分值; K_l 为四个计算要素的权重; l 为影响因素的各数 ($l=4$);

在地理信息系统平台上,地表形态指数的计算是利用叠加分析法来实现的. 叠加分析是空间信息系统中常用的提取隐含信息的手段之一,其目的是寻找和确定同时具有几种地理属性的地理要素的分布,或是按照确定的地理指标,对叠加后产生的具有不同属性级别的多边形进行分类或分级. 空间叠加运算,就是把同一地区的两幅或两幅以上的图层重叠在一起进行图形运算和属性运算(关系运算),产生新的空间图形和属性的过程. 经过上述对各影响因素标度的赋值,参考每个计算要素的权重,根据对黄土高原地区所划分的计算单元,依次计算所有计算单元的地表形态指数,就可以得到黄土地区地表形态指数分布图(图2),指数数值越大,表明该地区地形对公路建设的影响越大.

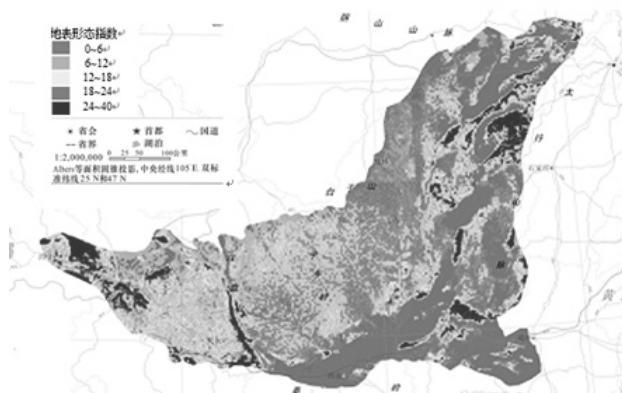


图1 黄土地区地表形态指数分布图

Fig.1 Distribution map of surface morphology index in loess area

从图1可以看出,黄土地区地表形态指数存在明显的空间分异规律. 汾、渭河谷盆地、黄土台塬、阶地区及豫西山地、河谷、黄土梁、阶地区(地表形态指数在以0~6为主)地势平坦,地形地貌对公路建设影响很小;在陇西中北部黄土梁区、鄂尔多斯高原中南部黄土梁、塬区(地表形态指数以6~12为主)地势起伏不大,但是陇西中北部由于为砂黄土且冲刷作用强烈导致公路路基边坡稳定性往往受一定影响,增加公路建设、养护的难度;在山西东部山地、黄土梁区、鄂尔多斯高原中北部黄土梁

峁区以及陇西中东部黄土梁峁区(地表形态指数在以12~18为主)地势起伏较大,地形地貌情况较复杂,公路建设有一定难度;陇西东南部黄土梁、阶地区(地表形态指数在以18~24为主),地形情况复杂,切割较强烈,该区滑坡发育,对公路建设影响大;陇西西北部黄土梁、阶地区及山西西北部山地、丘陵、黄土梁峁区(地表形态指数在以>24为主),地表起伏强烈,地形情况复杂,公路勘测、施工、养护等难度大.

4 结 语

(1) 针对地形地貌条件复杂的黄土地区,提出以地表形态指数评价地表形态状况,通过计算发现地表形态指数存在明显的空间分异规律,能够客观地从微观和宏观方面全面地反映了地表形态情况.

(2) 选取黄土地区对公路建设影响最大几何要素:坡度、海拔高程、地表粗糙度、地表切割深度作为地表形态指数的计算要素,建立地表形态指数的计算公式.

(3) 在地表形态指数计算要素权重计算中采用层次分析法,克服了以往专家打分法的人为主观性影响,有效提高了权重计算的客观性.

(4) 借助地理信息系统和相关数据库,对影响地表形态的单因素进行了量化计算,并通过空间叠加运算得到了地表形态指数分布图,揭示了黄土地区地表形态分布规律,为该区域的公路自然区划、土地资源规划等提供基础依据.

参考文献 References

- [1] 许金良, 田林, 牛冬瑜. 基于RS-GIS的喀斯特地区公路生态选线[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2013,33(2): 1-9.
XU Jinliang, TIAN Lin, NIU Dongyu. Ecological highway route selection of Karst area based on RS-GIS[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013,33(2): 1-9.
- [2] 刘小军, 张永兴. 地形因素及围岩类别对偏压隧道的影响效应分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010,42(2):205-210.
LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing. Analysis of unsymmetrically loaded tunnel according to topographic factors and classification of the surrounding rocks[J]. Xi'an Univ. of Arch.&Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 205-210.
- [3] 吴智勇. 数字地形模型在城乡建设用地增减挂钩项目中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2013,36(10):157-161.

- WU Zhiyong, Application of digital terrain model in connection project of rural-urban construction land [J], Geomatics & Spatial Information Technology, 2013,36(10): 157-161.
- [4] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. 农业工程学报, 2013,29(13):81-89.
GUO Minghang, YANG Qinke, WANG Chunmei. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 81-89.
- [5] 王闰超, 苏生瑞, 李鹏, 等. 基于R型因子分析法的滑坡发育影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2014,22(1): 30-37.
WANG Yanchao, SU Shengrui, LI Peng, et al. Analysis of landslide influence factors of R-factor analysis[J], Journal of Engineering Geology, 2014,22(1): 30-37.
- [6] 郝振纯, 张越关, 杨传国, 等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪的影响[J]. 水科学进展, 2013,24(3):311-318.
HAO Zhenchun, ZHANG Yueguan, YANG Chuan-guo, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region[J]. Advances in Water Science, 2013,24(3):311-318.
- [7] 马保成, 田伟平, 张小荣, 等. 中国公路综合自然区划分区指标[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(6): 33-38.
MA Baocheng, TIAN Weiping, ZHANG Xiaorong, et al. Dividing index for highway comprehensive natural division of China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 33-38.
- [8] 齐洪亮, 田伟平, 张小荣. 中国公路地貌区划指标体系[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(3): 33-38.
QI Hongliang, TIAN Weiping, ZHANG Xiaorong. Index system of landform regionalization for highway in China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011,31(3): 33-38.
- [9] 齐洪亮, 田伟平, 舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技, 2010,27(3): 12-16.
QI Hongliang, TIAN Weiping, SHU Yanjun. Research in hydrological regionalization for highway in China based on slope runoff intensity[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010,27(3): 12-16.
- [10] 贾兴利, 许金良, 杨宏志, 等. 基于GIS的地表破碎指数计算[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(11): 126-130.
JIA Xingli, XU Jinliang, YANG Hongzhi, et al. Calculation of broken index of surface based on GIS[J]. Journal of Chong'qing University, 2012, 35(11): 126-130.
- [11] 马明国, 管频, 李志强, 等. 基于遥感与GIS的甘肃省公路工程困难指数计算[J]. 中国公路学报, 2007,20(2): 18-21.
MA Mingguo, GUAN Pin, LI Zhiqiang, et al. Calculation of difficulty index of highway engineering in Gansu province based on remote and GIS [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(2): 18-21.
- [12] 田茂杰. 新疆公路三级自然区划的影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007,27(5): 49-52.
- TIAN Miaojie, Influencing factors of third level natural division for highway construction in Xinjiang province[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007,27(5): 49-52.
- [13] 徐强, 陈忠达, 黄杰. 关于河南省公路三级自然区划的探讨[J]. 河南交通科技, 2000,20(6): 31-33.
XU Qiang, CHEN Zhongda, Huang Jie. Study on the third rank division of highway in Henan province[J]. Science and Technology of Henan Communication, 2000,20(6): 31-33.
- [14] 张碧琴, 李霞, 李江华, 等. 新疆公路三级区划指标体系的建立[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(4): 21-25.
ZHANG Biqin, LI Xia, LI Jianghua, et al. Symbolic system of third level natural division for highway construction in Xinjiang province[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 21-25.
- [15] 张碧琴, 李江华, 田茂杰, 等. 新疆公路三级区划设计参数的研究[J]. 中国公路学报, 2005,18(3): 18-26.
ZHANG BiQin, LI Jianghua, TIAN Maojie, et al. Research on design parameter of the third rank division for highway in Xinjiang[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005,18(3): 18-26.
- [16] 杨景春, 李有利. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
YANG Jingchun, LI Youli. Principle of Geomorphology[M], Beijing: Peking university press, 2005.
- [17] 张根寿, 现代地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG Genshou. Modern Geomorphology[M], Beijing: Science Press, 2005.
- [18] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
CHEN Yongzong, JING Ke, CAI Guoqiang. Modern erosion and treatment in loess plateau[M], Beijing: Science Press, 1988.
- [19] 周启明, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHOU Qiming, LIU Xuejun. Digital terrain analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002. TANG Guoan, CHEN Zhengjiang, ZHAO Mudan, et al. ArcView GIS spatial analysis method [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [21] 朱长青, 史文中. 空间分析建模与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHU Changqing, SHI Wenzhong. Spatial analysis model and principle[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [22] 杨新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001,21(1): 29-33.
YANG Xinhua, YANG Qinke, TANG Guoan. Extraction and Application of relief of China Based on DEM and GIS Method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(1): 57-62.

(本文编辑 沈波)