

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.09.007

公路路域带状地形的自动分类方法

周访滨^{1,2}, 孟凡一¹, 邹联华¹, 张珊珊³

- (1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 数字带状地形数据是当前公路工程勘察阶段必需的基础性数据, 实现数字带状地形的合理分类是公路工程精细化设计、公路建设期能耗计算及路域生态保护的前提与基础。针对传统公路带状地形分类方法存在地形因子单一、分类决策知识模糊和主观因素影响大等问题, 依据《公路路线设计规范》及《公路工程技术标准》中对地形分类的要求, 结合公路地形分类相关研究成果, 提出了以地表坡度、相对高程和地形起伏度为主要地形因子组合的公路带状地形分类决策方案, 借鉴已有数字地形分析技术建立了中尺度公路路域数字地形自动分类方法。该方法以栅格DEM为数据源, 基于聚类的方法, 通过图层叠加分析, 实现了公路路域地形分类规则快速构建与直观获取分类结果。并采用公路路域带状栅格DEM进行分类试验, 结果表明, 该方法相较于由地貌专家人工勾画为传统的公路地形分类法, 工作量小, 速度快, 成本低, 且可有效分出平原、微丘、河谷、山岭和重丘5类典型公路路域地形, 分类结果残缺率为10.16%。

关键词: 道路工程; 分类决策方案; 数字地形分析; 地形分类; 栅格DEM

中图分类号: U412.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)09-0050-07

A Method for Automatic Classifying Strip Landforms in Road Area

ZHOU Fang-bin^{1,2}, MENG Fan-yi¹, ZOU Lian-hua¹, ZHANG Shan-shan³

- (1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410114, China;
2. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China; 3. Yunnan Transport Planning & Design Institute Co., Ltd., Kunming Yunnan 650041, China)

Abstract: Digital strip landform data is the necessary basic data in the current stage of highway engineering investigation. Realizing the reasonable classification of digital strip landform is the prerequisite and basis for detailed design of highway engineering, calculation of energy consumption during highway construction and ecological protection of road area. Aiming at the problems of single landform factor, vague classification decision knowledge, and great influence of subjective factor in the traditional road strip landform classification method, according to the requirements of landform classification in *Design Specification for Highway Alignment* and *Technical Standard of Highway Engineering*, combining with the relevant research results of highway landform classification, A new decision scheme of highway strip landform classification that takes surface slope, relative elevation and landform relief as the main landform factor combination is proposed. With reference to the existing digital landform analysis technology, an automatic digital landform classification method for medium-scale highways is established. This method takes grid DEM as the data source, it realizes the rapid construction of road landform classification rules and intuitively obtains the classification result based

收稿日期: 2019-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671446); 长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室开放基金项目(kfj140502)

作者简介: 周访滨(1975-), 男, 甘肃灵台人, 博士, 副教授。(Arthur1975@126.com)

on clustering method and layer overlay analysis. And the classification experiment is carried out by using the strip grid DEM for road area. The result shows that compared with the traditional highway landform classification method mainly based on artificial outlines by geomorphologists, this method has the advantages of small workload, high speed and low cost, it can provide local road landform thematic map for highway project construction, it can effectively classify plains, micro-hills, river valleys, mountains and heavy hills, and the incomplete rate of classification result is 10.16%.

Key words: road engineering; classification decision scheme; digital landform analysis; landform classification; grid DEM

0 引言

公路路域地形是影响公路工程线形布设、生态环境评估和经济评价等相关技术指标的关键因素之一,我国公路工程标准^[1-2]的制定,不仅考虑公路技术等级,而且考虑地形类别的差异,使之既满足交通量的要求,又符合工程经济的原则。不同地形条件使得道路在建设过程中能耗存在差异,需要针对高速公路建设期能耗的特性,采用与地形相关的数据与合理统计方法进行科学定量的分类^[3]。公路开发建设项目与坡向、沟谷、隆起等微地形联系较为紧密,尤其是海拔、坡位、坡向、坡度等山地微地形条件对群落结构及物种分布影响显著^[4]。因此公路路域带状地形分类是有效评估地形类别对公路工程影响的基础工作。

随着数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)精度的不断提高,数字地形因子的挖掘及地形因子对土地利用变化影响分析也逐渐深入,国内外很多学者做出了丰富的成果,将基于DEM的地形分类逐步推向小尺度及微观层面的半自动或自动化分发展方向^[5-6]。周访滨^[7-8]前期的研究认为区域地形分类是全局地形分类的延续和深化,但比全局地形分类有着更为广阔的应用前景,是获取局部专题地形信息的手段之一,可为交通、电力和水利等多个应用领域提供专题地形信息。在黄土地形地貌分类研究领域,李小曼^[9]根据正负地形特征和剖面曲率将DEM划分为梁峁地、沟坡地、沟底地,分类后使用最小面积原则的滤波方法对土地覆盖分类图与土地类型分类图进行处理,并以土地类型边界为标准进行图斑的叠加重组,有效解决由于受到复杂地形的影响,黄土丘陵沟壑区遥感影像地被分类精度低且不具有地形特征等问题。为了揭示不同黄土地貌类型沟沿线地形起伏分形结构复杂动力学特征,曹建军^[10]应用多重分形分析方法对黄土高原6种不同地貌类型的沟沿线地形起伏特征进行了研究,这

些研究为黄土高原地区地形分析应用提供了有效参考。在地形分类的自动化方面,Dornik^[11]以SRTM为数据源,利用随机森林分类器,对山体类型进行详细的划分和分类,实现了微观层面的地形自动化分类;周访滨^[6]构建了一种以栅格DEM为数据源的BP神经网络,将山体部位分类智能化,解决了分类残缺问题。地形地貌类别作为基础地理属性要素,对工程选址、土地利用格局影响以及土地生态学研究等有重要意义。公路数字带状地形在道路选线以及公路工程勘察设计中发挥着重要作用,但公路路域带状地形所蕴含的丰富信息却没有被充分利用,如何利用数字地形分析技术,对特定区域数字高程模型进行信息挖掘亟待深入研究。本研究以公路路域数字带状地形分类为对象,创建了以坡度、相对高程和地形起伏度为主要地形因子组合的公路带状地形分类决策方案和自动分类方法,期待为公路工程勘察期精细化设计、建设期能耗统计定额计算及路域生态保护等方面提供基础技术支持。

1 公路路域带状地形分类存在的问题

1.1 分类体系的不确定性

为了满足公路设计规划、道路选线以及公路施工建设等要求,不少学者在公路地形地貌学方面进行了研究,并取得了丰硕的研究成果。李斌^[12]在《公路工程地质》里以地貌绝对高度、相对高度以及地表平均坡度等形态为依据进行划分,将公路地貌分为山地与平原两大类,高山、中山、低山、丘陵、高原、高平原、低平原与洼地8小类;杨少伟^[13]在《道路勘测设计》中以地表自然坡度和相对高度为依据将公路地形分为平原、微丘、山岭和重丘;在《公路建设项目用地指标》^[14]中规定了公路建设项目用地地形划分原则,将公路地形分为平原、微丘和山岭重丘;齐洪亮等^[15]综合考虑地貌形态和大地成因,依据地表坡度和相对高程将中国公路地貌分为平原、微丘、重丘和山岭;韩志强等^[16]结合前人对

公路地形分类的研究，并考虑新疆区域特殊地理环境，使用海拔高度和相对高度将新疆区域内公路地形划分为平原、丘陵、山地和沙漠。

上述各研究成果提出的公路地形分类方案，存在分类体系不确定性问题：首先公路地形类别有差异。在《公路建设项目用地指标》^[14]中山岭与重丘为一类地形即“山岭重丘”，在《道路勘测设计》与齐洪亮^[15]等人研究中则将其分为山岭与重丘两类地形，而李斌^[12]在《公路工程地质》中将地形在平原、山地两大类的基础上继续分成 8 小类，现行的《公路路线设计规范》（JTGD20—2017）以及《公路工程技术标准》（JTGB01—2014）中所涉及的河谷地形在以上分类中未出现。其次分类依据也有较大的差异。韩志强等^[16]考虑大地构造以及地貌特征，以地貌相对高程和绝对高程为分类依据，在《道路勘测设计》、《公路工程地质》与《公路建设项目用地指标》中则综合考虑了地貌形态与地形的成因，以相对高程和坡度作为分类依据。由此可见，目前公路地形领域缺乏公认的统一分类体系，因此研究确立一种既满足《公路路线设计规范》（JTGD20—2017）和《公路工程技术标准》（JTGB01—2014）要求又适用于公路工程勘察阶段精细化设计的数字地形分类体系势在必行。

1.2 分类决策方案的模糊性

公路路域地形分类决策方案是实现公路路域地形分类的重要依据，合理选取分类因子并拟定分类因子阈值，决定着分类方案的科学性、有效性。一般原则下制定的分类决策方案应尽可能地全覆盖公路路域地形特征，不仅要能反映公路路域地形的空间分异规律，也要符合公路用地建设的实际需求。在已有的分类决策方案中，李斌^[12]从公路工程地质学角度将平均坡度、绝对高度和相对高度作为地形划分指标，确定平均坡度 5°以上为山区；绝对高度小于 500 m 且相对高度小于 200 m 为丘陵；200 m 以下为平原。杨少伟^[13]从道路勘探设计的角度以自然坡度和相对高程制定分类决策方案，自然坡度小于 3°划分为平原；自然坡度小于 20°且相对高程小于 100 m 划分为微丘；自然坡度小于 20°划分山岭重丘。在《公路建设项目用地指标》^[14]中要求自然坡度小于等于 3°为平原；自然坡度 3°~20°（不含 20°）且相对高度小于 200 m 为微丘；自然坡度大于 20°且相对高度为 200~1 000 m 时为山岭重丘；齐洪亮等^[15]采用坡度和相对高程为分类指标研究中国公路地貌区划，将坡度在 3°~20°之间且相对高程小于

100 m 定义为微丘；坡度大于 20°且相对高程在 100~200 m 之间定义为重丘；坡度大于 20°且相对高程大于 5 200 m 定义为山岭；坡度小于 3°定义为平原。韩志强等^[16]在探讨新疆公路工程地貌类型时将坡度小于等于 3°划分为平原；相对高程小于 100 m 划分为丘陵；相对高程小于 100 m 沙地类型划分为沙漠。详细分类决策如表 1~表 5 所示。

表 1 公路工程地质中地形类别^[12]

Tab. 1 Landform classification in highway engineering geology			
地形类别	绝对高度/m	相对高度/m	平均坡度/(°)
山地	高山	>3 500	>1 000
	中山	1 000~3 500	500~1 000
	低山	500~1 000	200~500
	丘陵	<500	<200
平原	高原	>600	—
	高平原	>200	—
	低平原	0~200	—
	洼地	低于海平面	—

表 2 道路勘测设计中地形类别^[13]

Tab. 2 Landform classification in road survey and design		
地形类别	自然坡度/(°)	相对高程/m
平原	<3	—
微丘	<20	<100
山岭重丘	<20	—

表 3 公路建筑用地规范中地形类别^[14]

Tab. 3 Landform classification in specification of land use for highway construction		
地形类别	自然坡度/(°)	相对高程/m
平原	≤3	—
微丘	3~20（含 20）	<200
山岭重丘	>20	200~1 000

表 4 中国公路地貌区划指标体系中地形类别^[15]

Tab. 4 Landform classification in Chinese highway topography division indicator system		
地形类别	自然坡度/(°)	相对高程/m
平原	≤3	—
微丘	3~20	<100
重丘	>20	100~200
山岭	>20	200~1 000

经对比分析已有各分类决策方案，其地形因子的选取与阈值的确定存在差异，有的存在一定的矛盾。例如《公路建设项目用地指标》^[14]规定，自然

表5 新疆公路工程地貌中地形类别^[16]

Tab. 5 Landform classification in Xinjiang highway engineering topography

地形类别	自然坡度/(°)	相对高程/m
平原	≤3	—
丘陵	—	<100
沙漠	—	<100 (沙地类型)

坡度 $3^{\circ} \sim 20^{\circ}$ (不含 20°) 且相对高度小于200 m 为微丘, 而齐洪亮等^[15]在《中国公路地貌区划研究》中微丘地形为: 坡度 $3^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 且相对高程小于100 m, 依据此分类决策方案将导致较大差异的分类结果。因此制定一种地形因子选取与组合科学合理和因子阈值明晰的分类决策方案, 将作为实现公路路域带状地形自动分类的关键技术。

2 数字带状地形分类依据和方法

2.1 分类特征的选择

选取能够定量表达局部地形复杂程度的特征, 是现实公路路域地形自动化和数字化分类的前提与保证。为了实现公路路域地形数字化分类, 根据《公路工程技术标准》(JTGB01—2014) 与《公路路线设计规范》(JTGD20—2017) 中对公路路域地形的要求, 结合公路工程建设实际需求, 并借鉴地形学、公路地貌学等领域研究成果, 最终选取坡度、相对高程与地形起伏度这3类地形因子组合表达公路路域地形特征。

坡度表示点在地形表面的倾斜程度, 能表达极为丰富的地形信息。在众多地形分类研究中, 坡度均在地形分类决策方案中作为关键因子被广泛使用^[17-18], 因此首选坡度因子作为制定分类决策方案的第一要素, 最大程度描述区域地形坡态信息。针对重丘、山岭和河谷地形, 单纯依靠坡度无法有效刻画其地类特征, 为此引入相对高程和地形起伏度作为辅助要素与坡度组合表达重丘、山岭和河谷这3类地形特征。相对高程作为反映地表破碎程度的重要指标之一, 也是地形地貌分类中的分类指标之一^[19], 能够较好地表述区域地表的高低起伏。引入相对高程符合实际公路建设需求, 也能够有效解决传统地貌分类过程中因使用海拔高程所引起的分类结果与实际观察不相符问题。地形起伏度指地貌单元内最高点与最低点的相对高程, 可直接反映地貌的形态状况, 地形起伏度作为分类特征在区域地貌分类中有着广泛且重要的应用^[20-21]。从公路建设的角度讲, 地形起伏度对公路线形的布设、施工、养

护、公路病害的产生与经济评价等都具有重要的影响。

2.2 分类决策方案

公路工程对地形分类的应用需求与地理学或其他学科的地形地貌研究有一定区别, 为适应公路工程的地形要求, 本研究以坡度、相对高程和地形起伏度为主要地形因子组合制订了公路带状地形分类决策方案, 如表6所示, 在公路地形地貌研究、规范中^[12-16]均选取 3° 、 20° 作为分类指标, 较为客观、简洁地反映了地形与公路工程建设的关系, 且符合各类公路规范要求。针对河谷这类特殊地形, 本研究参考曾徨耀在文献[19]中的经验成果, 选取地表坡度 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 之间定义河谷, 综合得到最终坡度分类指标阈值分别为: 平原地表坡度 $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$, 河谷坡度 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$, 微丘坡度 $3^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 山岭和重丘坡度 20° 以上。随着地形相对高程的增加, 实际公路建设的困难程度也随之增大, 因此在选择相对高程的分类指标时, 必须考虑相对高程对公路建设的影响, 本研究制订的分类决策方案参考了齐洪亮^[15]与韩志强^[16]等人在公路地貌区划中的研究成果, 将相对高程的分类指标界线定义为: 微丘相对高程小于100 m, 重丘相对高程100~200 m, 山岭相对高程大于200 m。由于地形起伏度在公路地形分类中使用较少, 本研究参考《中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究》^[22]关于平原、河谷、丘陵、小起伏山地的划分标准, 并结合牛玉欣^[23]在《基于GIS的公路自然区划方法研究》中分析地形起伏度分级阈值对公路建设的影响, 最终将地形起伏度分类指标定义为: 平原地形起伏度小于20 m, 河谷地形起伏度小于50 m, 微丘和重丘地形起伏度50~120 m, 山岭地形起伏度大于120 m。

2.3 分类方法及流程

为实现公路路域带状地形自动分类, 借助数字地形分析技术, 本研究以栅格DEM为数据源, 依据2.2节确定的分类决策方案, 制定如图1所示的分类流程, 创建公路路域带状地形基于规则知识的自动分类方法。该方法主要依赖叠加分析, 在选取合适尺度栅格DEM的基础上, 进行裁切、展线等预处理获取公路路域带状地形, 利用窗口分析法提取坡度、相对高程和地形起伏度; 再综合分析这3类地形因子, 按照表6分类决策方案, 进行逻辑运算与图层叠加分析, 最终得到公路路域带状地形分类结果。

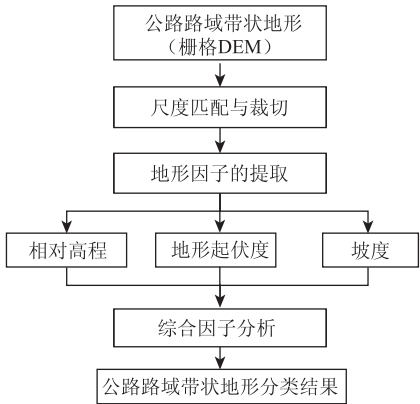


图 1 地形分类流程图

Fig. 1 Flowchart of lanform classification

表 6 公路路域带状地形分类决策方案

Tab. 6 Decision-making scheme for highway strip landform classification

地形类别	地形特征		
	坡度/(°)	相对高程/m	地形起伏度/m
河谷	3 ~ 7	—	< 50
平原	< 3	—	< 30
山岭	> 20	> 200	> 120
微丘	3 ~ 20	< 100	50 ~ 120
重丘	> 20	100 ~ 200	50 ~ 120

3 试验分析

3.1 试验数据

本研究选取 1:10 000 栅格 DEM 为源数据，以公路中心线两侧 200 m 范围为公路路域范围，试验区内公路全长 5.2 km，试验区范围内最高点高程为 1 069 m，最低点高程为 863 m，相对高差为 206 m。试验区栅格 DEM 像素大小为 5 m×5 m，共有 86 376 个像素点，试验区数据如图 2 所示。

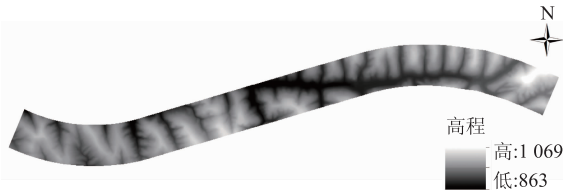


图 2 试验区 DEM (单位: m)

Fig. 2 DEM of experimental area (unit: m)

3.2 地形因子的提取

本研究涉及的坡度、相对高程和地形起伏度 3 类地形因子，当以栅格 DEM 为数据源时已有较为成熟、快捷的提取方法，其中最为常见和经典的方法当属窗口分析法，坡度的提取通常采用基于空间矢

量分析原理的差分计算方法，相对高程则是使用所有栅格点高程减去最低点高程值。需要特别指出的是，在提取地形起伏度时，随着分析窗口尺度的增加，地形起伏度也会相对应增加，因此确定地形起伏度的关键是确定分析窗口的大小。本研究通过滑动窗口分析法先确定一系列统计窗口大小与对应的地形起伏度（3 像素×3 像素到 30 像素×30 像素，间隔为 1 像素），再采用均值变点法求得最佳尺度分析窗口大小为 12 像素×12 像素，即为 0.36 km²。利用窗口分析法提取的试验区坡度、相对高程和地形起伏度分别如图 3～图 5 所示。



图 3 试验区坡度

Fig. 3 Slope of experimental area

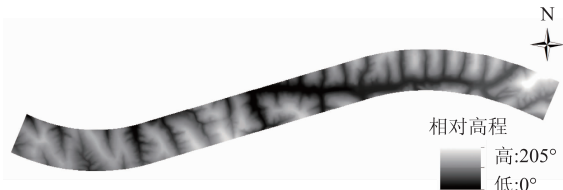


图 4 试验区相对高程 (单位: m)

Fig. 4 Relative elevation of experimental area (unit: m)

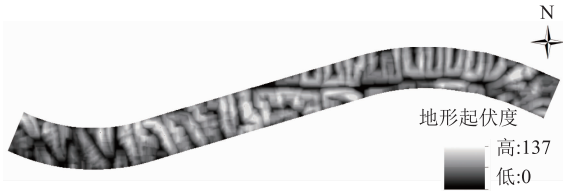


图 5 试验区地形起伏度 (单位: m)

Fig. 5 Relief of experimental area (unit: m)

3.3 试验结果与分析

以表 6 形成的公路路域带状地形分类决策方案为试验分类依据，按照图 1 所示分类流程将试验区划分为平原、河谷、微丘、重丘和山岭 5 类地形，获得分类结果如图 6 所示。利用分类结果中各地形类别栅格点数占比统计，其中微丘为 22.25%、重丘为 65.27%、平原为 1.12%、山岭为 1.19%、河谷为 0.40%，总计 89.84%，可知本试验分类残缺率为 10.16%，分类结果统计如表 7 所示。本研究所设计的公路路域带状地形分类法相较于其他分类方法，

无需公路地貌分类方面的专家实地指导, 分类工作量更小, 分类速度快, 分类成本低, 适宜复杂地形的精细化公路工程, 能够实现数字化地形分类。

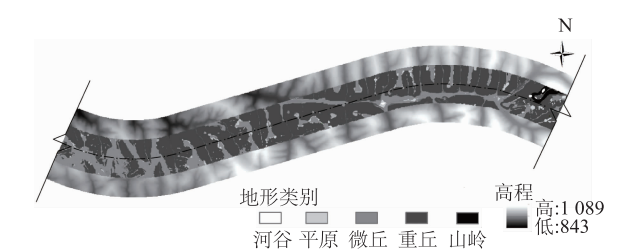


图 6 公路路域带状地形分类

Fig. 6 Classification of strip landforms in highway area

表 7 分类结果统计

Tab. 7 Statistics of classification results

地形类别	河谷	平原	山岭	微丘	重丘	总计	残缺点
栅格点数	37	1 019	1 051	20 233	59 341	81 681	9 242
所占百分比/%	0.40	1.12	1.19	22.25	65.27	89.84	10.16

4 结论

以数字地形分析技术为支撑, 在已有公路自然区划、地形地貌分类基础上引入宏观地形因子地形起伏度完善分类决策方案, 并实现了公路路域带状地形自动分类。试验表明本研究所创建的公路路域地形分类法避免了带状地形分类过程中人为主观因素的干扰, 分类过程相对简单、快速、高效, 能够提供局部公路路域地形专题图, 有望推动精细化公路工程勘察期设计中地形类别的判断。本研究创建的公路路域带状地形分类方法实质是基于规则知识的分类, 分类结果会受到格网分辨率、数据空间结构等因素的影响, 通常发生重叠和缺失现象, 因此公路路域带状地形分类的完整性仍需进一步优化。

参考文献:

References:

[1] JTG B01—2014, 公路工程技术标准 [S].
JTG B01—2014, Technical Standard of Highway Engineering [S].
[2] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].
JTD D20—2017, Design Specifications for Highway Alignment [S].
[3] 杨思琪, 李多奇, 符锌砂, 等. 基于地形因素的高速公路建设期能耗划分指标研究 [J]. 公路, 2017 (5): 150 – 154.
YANG Si-qi, LI Duo-qi, FU Xin-sha, et al. Research on Energy Consumption Division Index during Expressway

Construction Period Based on Terrain Factors [J]. Highway, 2017 (5): 150 – 154.
[4] 陈学平, 王云, 王新军, 等. 沟谷地形下路侧生物多样性特征 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (1): 152 – 158.
CHEN Xue-ping, WANG Yun, WANG Xin-jun, et al. Characteristics of Roadside Biodiversity of Valley Topography [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (1): 152 – 158.
[5] JASIEWICZ J, STEPINSKI T F. Geomorphons: A Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms [J]. Geomorphology, 2013, 182: 147 – 156.
[6] 周访滨, 邹联华, 张晓炯, 等. 栅格 DEM 微地形分类的 BP 神经网络法 [J]. 测绘通报, 2019 (10): 101 – 104, 132.
ZHOU Fang-bin, ZOU Lian-hua, ZHANG Xiao-jiong, et al. Micro Landform Classification Method of Grid DEM Based on BP Neural Network [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019 (10): 101 – 104, 132.
[7] 周访滨. 基于栅格 DEM 自动划分微观地貌形态的研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
ZHOU Fang-bin. Automated Classification of Micro Landform Based on Gird Digital Elevation Model [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2006.
[8] 周访滨, 刘学军. 基于栅格 DEM 的微观地形分类技术 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2008, 5 (4): 32 – 36.
ZHOU Fang-bin, LIU Xue-jun. Micro-landform Classification Technique and Experiment Based on Grid DEM [J]. Journal of Changsha University of Science And Technology: Natural Science Edition, 2008, 5 (4): 32 – 36.
[9] 李小曼, 王刚. DEM 支持的黄土丘陵沟壑区地被遥感分类方法 [J]. 水土保持研究, 2013, 20 (3): 110 – 114.
LI Xiao-man, WANG Gang. Research on DEM Based on Remote Sensing Classification Method in Loess Hilly Ravine Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20 (3): 110 – 114.
[10] 曹建军, 方炫, 那嘉明, 等. 基于多重分形的黄土高原不同地貌类型区沟沿线起伏特征研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33 (4): 51 – 56.
CAO Jian-jun, FANG Xuan, NA Jia-ming, et al. Study on the Characteristics of the Topographic Relief of Shoulder Line of Different Geomorphic Types in Loess Plateau Based on Multi-fractal [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33 (4): 51 – 56.

- [11] DORNIK A, DRAGUT L, URDEA P. Classification of Soil Types Using Geographic Object Based Image Analysis and Random Forests [J]. *Pedosphere*, 2018, 28 (6): 913–925.
- [12] 李斌. 公路工程地质 [M]. 北京: 交通出版社, 1987.
LI Bin. Highway Engineering Geology [M]. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [13] 杨少伟. 道路勘测设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
YANG Shao-wei. Road Survey and Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [14] 交通运输部. 公路工程项目建设用地指标 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport. Land Use Indicators for Highway Engineering Projects [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [15] 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 Hong-liang, TIAN Wei-ping, ZHANG Xiao-rong. Index System of Landform Regionalization for Highway in China [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2011, 31 (3): 33–38.
- [16] 杨发相, 穆桂金, 雷加强, 等. 新疆地貌及其过程对公路交通建设的影响 [J]. 干旱区地理, 2004 (4): 525–529.
YANG Fa-xiang, MU Gui-jin, LEI Jia-qiang, et al. Influences of the Landforms and Their Processes on the Construction of Highways in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2004 (4): 525–529.
- [17] 梁丽芳, 田时雨, 王燕云. 基于 DEM 的地形分类方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37 (8): 206–208.
LIANG Li-fang, TIAN Shi-yu, WANG Yan-yun. Research on Methods of DEM-based Terrain Classification [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2014, 37 (8): 206–208.
- [18] 万自凤. 云南省公路自然区划研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
WAN Zi-feng. Study on Natural Regionalization of Highways in Yunnan Province [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [19] 曾德耀. 基于最佳地形因子组合的地貌形态类型划分研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
ZENG De-yao. Classification of Geomorphological Types Based on Best Terrain Factor Combination [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [20] 李超. 中国公路自然区划地理信息系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
LI Chao. Research on Geographic Information System of Highway Natural Regionalization in China [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [21] 何文秀, 石云. 黄土丘陵沟壑区地形复杂度分析 [J]. 测绘科学, 2015, 40 (10): 146–152.
HE Wen-xiu, SHI Yun. Analysis of Terrain Complexity in the Hilly and Gully Area of Loess Plateau [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40 (10): 146–152.
- [22] 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 [J]. 地球信息科学学报, 2009, 11 (6): 707–724.
ZHOU Cheng-hu, CHENG Wei-ming, QIAN Jin-kai, et al. Research on the Classification System of Digital Land Geomorphology of 1: 1 000 000 in China [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11 (6): 707–724.
- [23] 牛玉欣. 基于 GIS 的公路自然区划方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
NIU Yu-xin. Research of Highway Natural Divisions Method Based on GIS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.