

# 基于军用车辆通过性的地形因子主成分分析

洪烈兵, 姜雄飞

(中国人民解放军 66069 部队, 河南 洛阳 471000)

**摘要:**为定量考察军用车辆通过性指标,从地形角度出发,确定 7 个地形因子,对 ASTER GDEM 高程数据进行空间分析,得到 7 类数据,运用主成分分析法对 7 种地形因子进行了相关性分析和因子分析,建立反映军用车辆复杂地形通过性的评价指标—综合地形指数  $Tr$ 。分析结果表明:综合地形指数  $Tr$  能够解释原有变量总方差的 87.623%, 可以作为军用车辆复杂地形通过性评价指标。

**关键词:**军用车辆;地形因子;主成分分析;综合地形指数

**本文引用格式:**洪烈兵,姜雄飞. 基于军用车辆通过性的地形因子主成分分析[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(S1): 105–110.

**Citation format:**HONG Liebing, JIANG Xiongfei. Terrain Factor Principal Component Analysis Based on Military Vehicle Passability[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(S1):105–110.

中图分类号:U116.2

文献标识码:A

文章编号:2096–2304(2020)S1–0105–06

## Terrain Factor Principal Component Analysis Based on Military Vehicle Passability

HONG Liebing, JIANG Xiongfei

(The No. 66069<sup>th</sup> Troop of PLA, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to quantitatively investigate the passing indicators of military vehicles, this paper started from the perspective of terrain and firstly determines seven terrain factors by referring to the literatures, and then spatially analyzed the ASTER GDEM elevation data to obtain 7 types of data, and finally used principal component analysis. Correlation analysis and factor analysis were carried out for seven terrain factors, and an evaluation index reflecting the complex terrain of military vehicles was established. The analysis results show that the comprehensive terrain index  $Tr$  can explain 87.623% of the total variance of the original variables, which can achieve the total use of integrating a single terrain factor, and can be used as an indicator for the comprehensive terrain passability evaluation of military vehicles.

**Key words:** military vehicle; terrain factor; principal component analysis; comprehensive terrain index

军用车辆通过性是指车辆在额定载重下以一定的平均车速通过复杂地形和松软地面的能力。国内外对车辆通过性研究开始于 20 世纪 70 年代,研究内容集中于地面特性和车辆结构的研究;G. Y. Baladi<sup>[1]</sup>总结了各种用于解决越野移动问题的预测技术,并给出了所需的地形数据类型。季学武

等<sup>[2]</sup>研究了土壤特性和车辆结构对轮式车辆通过性的影响。刘聚德<sup>[3]</sup>对车辆在沙地环境下的行驶的几个关键性技术做了研究。李阳等<sup>[4]</sup>对履带车辆进行了硬质路面、黏土路面、重黏土路面和干沙路面的爬坡仿真,分析了部分履带行走机构工作条件下的爬坡能力。

收稿日期:2020–01–02;修回日期:2020–02–24

基金项目:军内科研项目

作者简介:洪烈兵(1969—),男,工程师,主要从事装备后勤保障和理论研究。

通讯作者:姜雄飞(1990—),男,硕士,助理工程师,主要从事后勤保障与装备管理。

近些年,随着 GIS 技术的发展,国内外学者开始从地形角度对车辆通过性进行定性和定量评估。如 James J. Donlon<sup>[5]</sup>利用 GIS 技术构建了基于位置词汇表的定性越野通过性推理模型。刘华军<sup>[6]</sup>提出了针对基于高程图的越野地形描述方法,并根据模糊规则对地形可行性进行了评估。范林林<sup>[7]</sup>构建了基于六角格网的越野通行模型,并对最短路径规划算法进行了研究。但笔者发现大多数研究者在选择地形因子对车辆通过性进行评价时,未对地形因子的取舍进行客观说明,这易造成车辆越野通过性评价模型包含信息不全面。因此本文对影响车辆越野通过性的地形因子进行相关性分析,利用主成分分析法“降维”的思想,筛选整合出与车辆相关程度较高的因子,为定量评价车辆越野通过性提供决策依据。

## 1 主成分分析相关知识

### 1.1 主成分分析基本原理

主成分分析(Principal components analysis, PCA)由卡尔·皮尔逊于 1901 年发明,用于分析数据及建立数理模型<sup>[8]</sup>。在多元统计分析中,主成分分析方法常被用于减少数据集的维数,同时保持数据集对方的方差贡献最大的特征<sup>[8-9]</sup>。

假设数据集为  $n \times p$  阶矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

原数据集中指标数为  $p$ ,评价指标为  $x_1, x_2, \cdots, x_p$ ,经过主成分分析降维后,新的评价指标变为  $y_1, y_2, \cdots, y_q$ , ( $q < p$ ),即:

$$\begin{cases} y_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \cdots + l_{1p}x_p \\ y_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \cdots + l_{2p}x_p \\ \vdots \\ y_q = l_{q1}x_1 + l_{q2}x_2 + \cdots + l_{qp}x_p \end{cases} \quad (2)$$

系数  $l_{ij}$  的确定原则为:

①  $y_i$  与  $y_j$  ( $i \neq j, i, j = 1, 2, \cdots, q$ ) 相互无关;

②  $y_1$  是  $x_1, x_2, \cdots, x_p$  的一切线性组合中方差最大者,  $y_2$  是与  $y_1$  不相关的  $x_1, x_2, \cdots, x_p$  的所有线性组合中方差最大者;  $y_q$  是与  $y_1, y_2, \cdots, y_{q-1}$  都不相关的  $x_1, x_2, \cdots, x_p$  的所有线性组合中方差最大者。

新评价指标中的  $y_1, y_2, \cdots, y_q$  分别称为原评价指标  $x_1, x_2, \cdots, x_p$  的第 1, 第 2,  $\cdots$ , 第  $q$  主成分。

从上述理论分析中可以得出,主成分分析的本质在于实现降维处理,将原来评价指标中的  $p$  个变量转换为互不相关的  $q$  个变量 ( $q < p$ ),能够保证构造出的新变量能够包含初始  $p$  个变量的主要信息。

### 1.2 主成分分析的计算过程

原始数据各评价指标之间单位往往不相同,有的相差多个量级,直接对其进行相关性分析会使得结果不准确。

因此为了消除单位不同带来的影响需要首先对原始数据进行标准化处理,标准化计算公式为:

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S_i} \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为标准化之后的数值;  $X_i$  为原始数值;  $\bar{X}_i$  为样本数据的均值;  $S_i$  为样本数据的方差。

相关系数矩阵表达式为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $r_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \cdots, p$ ) 为原变量  $x_i$  与  $x_j$  的相关系数,  $r_{ij} = r_{ji}$ , 其计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (5)$$

式中:  $\bar{x}_i, \bar{x}_j$  为标准化数值的均值。

想要求解特征值和特征向量,就是求解特征方程  $|\lambda I - R| = 0$ ,常用雅可比法(Jacobi)求出特征值,并使其按大小顺序排列为:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0 \quad (6)$$

而后分别求出对应于特征值  $\lambda_i$  的特征向量  $e_i$  ( $i = 1, 2, \cdots, p$ ),要求  $\|e_i\| = 1$ ,即:

$$\sum_{j=1}^p e_{ij}^2 = 1 \quad (7)$$

式中:  $e_{ij}$  表示向量  $e_i$  的第  $j$  个分量。

主成分贡献率计算公式为:

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \cdots, p) \quad (8)$$

累计方差贡献率计算公式为:

$$\frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i = 1, 2, \cdots, p) \quad (9)$$

一般取累计方差贡献率超过 80% 的特征值,  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$  所对应的第 1、第 2、 $\cdots$ 、第  $m$  ( $m \leq p$ ) 个主成分。

主成分载荷计算公式为:

$$l_{ij} = p(z_i, x_j) = \sqrt{\lambda_i} e_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, p) \quad (10)$$

求解出的主成分得分作为各主成分中原指标前的系数,表达式为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 2 描述地面复杂度的地形因子

地形因子是地表形态分析的主要组成部分,被广泛用于描述地面复杂度<sup>[5]</sup>。用于描述地形特征和空间分布的地形参数很多,不同学科和领域的分类不尽相同。如:按地学应用范畴分为一般地形属性和水文特征;按地形要素的复杂性分为单要素和复合参数,其中单要素参数由高程数据直接得到,复合参数由几个单要素参数耦合而成;按地表信息的空间结构,可分为微观因子、宏观因子和其他相关信息因子三大类,其中微观因子包括坡度、坡向、地面曲率等,宏观因子包括地形起伏度、地面粗糙度等,其他相关信息因子包括太阳辐射通量密度、反射系数等<sup>[6]</sup>。对于军用车辆来说,主要考虑地表信息,因此对地形因子的分析应从微观因子和宏观因子入手<sup>[7]</sup>。

### 2.1 微观地形因子

微观地形因子包括坡度、坡向、地面曲率等,它们所描述和反应的是地面具体点位的地形信息特征。

#### 1) 坡度因子

地面坡度(Slope)可以表述为:地面某点的坡度是过该点的切平面与水平地面的夹角。是高度的变化的最大值比率,表示了地表面在该点的倾斜程度。地面坡度实质是一个微分概念,是将地面看做无限多个点组成,每个点都有各自的坡度。

地表上某点的坡度  $S$  是地表曲面函数  $Z=f(x,y)$  在东西、南北方向上的高程变化率的函数,坡度算法的数学表达式为:

$$S = \arctan \sqrt{p^2 + q^2} \times 180/\pi \quad (12)$$

式中: $S$  指坡度, $p$  是  $x$  方向上的高程变化率, $q$  是  $y$  方向上的高程变化率。因此,求解坡面某一点的坡度,关键是求解  $p$  和  $q$ 。

#### 2) 坡向因子

地面任何一点切平面的法线在水平面的投影与过该点的正北方向的夹角称为该点的坡向。按顺时针方向计算,坡向值范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ 。坡向的数学表达式为:

$$\text{Direction} = \arctan(p/q) \quad (13)$$

式中: $p$  是  $x$  方向上的高程变化率, $q$  是  $y$  方向上的高程变化率。

#### 3) 地面曲率

地面曲率是对地表面每一点弯曲变化程度的表征,地面曲率在垂直和水平两个方向上的分量分别平面曲率和剖面曲率。

平面曲率指在地形表面上,具体到任何一点,指用过该点水平面沿水平方向切地形表面所得的曲线在该点的曲率值,也就是每一点所在的地面等高线的弯曲程度,利用这个数值来量化的说明地表曲面沿水平方向的弯曲、变化情况,从而对地面的复杂程度进行表征。从另一个角度讲,地表曲

面的平面曲率也是对垂直于坡向的曲线弯曲程度的度量,其数学表达式为:

$$Kh = \frac{q^2 r - 2pq s + p^2 t}{(q^2 + p^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (14)$$

式中: $Kh$  指平面曲率; $p$  是  $x$  方向上的高程变化率; $q$  是  $y$  方向上的高程变化率; $s$  是该点坡度; $r$  是该点曲率半径。

剖面曲率是指在地形表面上,具体到任何一点,都有过该点的法线方向和微小范围内高程变化最大方向的平面和地形表面相交所得的曲线,所得曲线在该点的曲率值,即为剖面曲率。利用这个数值,来量化的说明地表曲面在垂直方向的弯曲、变化情况,从而对地面的复杂程度进行表征。从另一个角度讲,地表曲面的剖面曲率也是对地面坡度的沿最大坡度方向变化率情况的度量,其数学表达式为:

$$Kv = \frac{p^2 r + 2pq s + q^2 t}{(q^2 + p^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (15)$$

式中: $Kv$  指剖面曲率; $p$  是  $x$  方向上的高程变化率; $q$  是  $y$  方向上的高程变化率; $s$  是该点坡度; $r$  是该点曲率半径。

### 2.2 宏观地形因子

宏观的地形因子包括地形起伏度、地表粗糙度、高程变异系数等,它们所描述和反应的是地面比较大区域内宏观的地形特征。

#### 1) 地形起伏度

地形起伏度也称为地势起伏度或地势能量、局部地势、相对高度,是指在一个特定的区域内,最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值。它是描述一个区域地形特征的一个宏观性的指标,其数学表达式如下:

$$R = H_{\max} - H_{\min} \quad (16)$$

式中: $R$  代表地形起伏度; $H_{\max}$  代表单位面积内最大高程值; $H_{\min}$  代表单位面积内最小高程值。

#### 2) 地表粗糙度

地表粗糙度是反映地表的起伏变化和侵蚀程度的指标,一般定义为地表单元的曲面面积曲面与其在水平面上的投影面积水平之比。其数学公式表达为:

$$R = S_{\text{曲面}}/S_{\text{水平}} = 1/\cos(\text{Slope}) \quad (17)$$

式中: $S_{\text{曲面}}$  指地表单元的曲面面积; $S_{\text{水平}}$  指地表单元在水平面的投影面积; $\text{Slope}$  指地表坡度。

地表粗糙度是能够反映地形的起伏变化和侵蚀程度的宏观地形因子。在区域性研究中,地表粗糙度是衡量地表侵蚀强度的重要量化指标,在研究水土保持及环境检测时研究地表粗糙度也有很重要的意义。

#### 3) 高程变异系数

高程变异系数(Variance Coefficient in Elevation)是反映地表一定距离范围内,高程相对变化的指标,以该区域高程标准差与平均值的比值来表示。其数学表达式为:

$$VCE_i = S_i/\bar{Z}_i \quad (18)$$

式中: $VCE_i$  指统计区域的地形高程变异系数; $S_i$  指统计区域高程标准差; $\bar{Z}_i$  指统计区域高程的平均值; $i$  为自然数,指



表2 相关系数矩阵

相关系数	坡度	坡向	平面曲率	剖面曲率	地面起伏度	地表粗糙度	高程变异系数
坡度	1.000						
坡向	0.152	1.000					
平面曲率	-0.081	-0.122	1.000				
剖面曲率	-0.001	0.091	-0.679	1.000			
地面起伏度	0.753	0.294	-0.053	0.007	1.000		
地表粗糙度	0.958	0.153	-0.110	0.031	0.725	1.000	
高程变异系数	-0.012	-0.072	-0.032	-0.087	0.050	0.032	1.000

从表2可以看出,坡度、地面起伏度、地表粗糙度相关系数超过0.7,呈现极高的相关性;平面曲率和剖面曲率之间相关系数为-0.679,相关性较高,且呈负相关性;坡向和坡度、地面起伏度、地表粗糙度之间存在相关性,但相关程度较低,应该舍弃;高程变异系数和其他6个地形因子之间相关性较差,应该舍弃。从车辆通过性角度考虑,坡度信息应该保留,因此选择使用坡度、地面起伏度和地表粗糙度进行主成分分析。

3.3 主成分分析

对坡度、地面起伏度和地表粗糙度进行主成分分析,结果如表3所示。

表3 主成分方差和累计方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差%	累积%	特征值	方差%	累积%
1	2.629	87.623	87.623	2.629	87.623	87.623
2	0.330	11.000	98.623			
3	0.041	1.377	100.000			

根据特征值大于1的原则提取1个主成分,该主成分解释了原有变量总方差的87.623%(80%~85%以上较佳,可代表原指标的绝大部分信息)。

由因子负荷矩阵旋转后得到的表4可知,

表4 旋转后的因子负荷矩阵

地形因子	第1主成分
坡度	0.969
地面起伏度	0.876
地表粗糙度	0.960

第一主成分与坡度、地面起伏度和地表粗糙度呈正相关,它主要的意义在于将坡度、地面起伏度和地表粗糙度进行整合,形成表征地形信息的综合指数,因此可以将该主成分称为综合地形指数,该指数包含了坡度信息,高程差信息

和地表粗糙信息,很大程度上决定了军用车辆复杂地形通过能力。

表5是根据回归算法计算出来的主成分得分,也就是得分函数的系数,

表5 主成分得分

地形因子	第1主成分
坡度	0.369
地面起伏度	0.333
地表粗糙度	0.365

根据表5可得主成分得分函数:

$$Tr = 0.369 * Slope + 0.333 * R_1 + 0.365 * R_2 \quad (19)$$

式中:Slope为坡度; $R_1$ 为地面起伏度; $R_2$ 为地表粗糙度。

3.4 结果验证

为了验证综合地形指数Tr是否具有指导价值,在ARC-GIS软件中对某地域以综合地形指数Tr为指标进行数据处理,得到结果如图3。

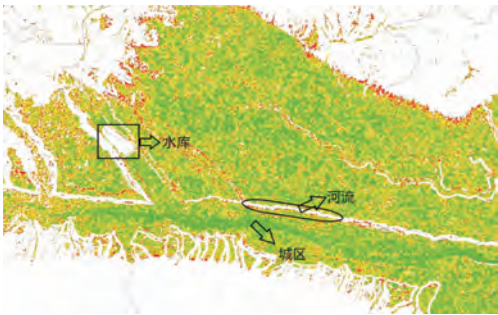


图3 某地域综合地形指数结果图

可以看出,利用综合地形指数Tr对地形进行评价,得到的结果图中能够识别出河流、水库等军用车辆的不可能通过区;同时,对于通过区,综合地形指数进行了分级,由绿到红表示通过区中对于军用车辆而言通过性由易到难。

根据该地域综合地形指数结果图,选取四处作为考察点进行了实地考察结果如图4所示。

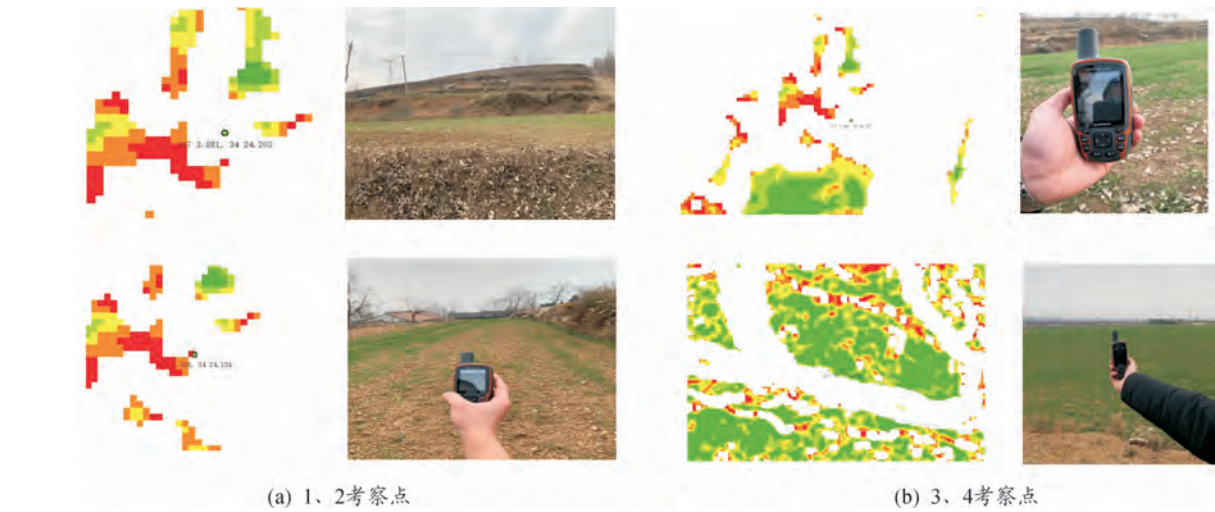


图4 某地域实地考察结果图

表6列出了综合地形指数 $Tr$ 给出的车辆通行性结果与实地考察结果。可以看出,所选取的四个考察点均和综合地形指数 $Tr$ 给出的结果一致,因此,利用该指数能够对军用车辆通过性进行评价。

表6 考察结果				
目标点	1	2	3	4
综合地形指数	不可通过	能通过	不可通过	易通过
实地观测结果	不可通过	能通过	不可通过	易通过

4 结论

1) 坡度、地面起伏度和地表粗糙度相关性较高,坡向、高程变异系数与其他地形因子基本不存在相关性,不能够用于主成分分析,平面曲率和剖面曲率具有较高相关性,但是和坡度、地面起伏度及地表粗糙度不相关。

2) 综合考量本文以坡度、地面起伏度及地表粗糙度三种地形因子进行了特征值和主成分得分的求解。根据计算结果,综合地形指数 $Tr$ 即第一特征值包含了3种地形因子中87.623%的信息,可作为坡度、地面起伏度及地表粗糙度三者的综合属性集合。

3) 综合地形指数 $Tr$ 中坡度占比为36.9%,地面起伏度占比为33.3%,地表粗糙度占比为36.5%。

4) 利用综合地形指数 $Tr$ ,在ARCGIS软件中对某地域进行了车辆越野通过性评估,评估结果能够正确区分可通过区和不可通过区,并对可通过区进行了等级划分。

参考文献:

[1] 李世武,张召丽,杨春苇,等.坡道行驶车辆通过性分析

与路径优化[J].科学技术与工程,2018,18(22):144-149.

[2] 樊智涛.越野汽车性能分析及发展展望[J].山东工业技术,2018(21):51.

[3] 姚明,何建清,何仁,等.越野汽车机动性评价中车速的确定[J].汽车工程,2012,34(10):885-888.

[4] 李培琳,韦新良,汤孟平.基于NFI和DEM数据的浙江森林立地分类研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2018,38(03):137-144.

[5] 杨荣凤,杨昆,洪亮,等.基于不同空间分辨率DEM的地形因子分析比较[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(05):75-78.

[6] 刘新华.区域水土流失地形因子分析与提取研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2001.

[7] 王妍.基于DEM的地形信息提取与景观空间格局分析[D].重庆:西南大学,2006.

[8] 董健卫,陈艳美,孟盼.基于主成分分析的PM2.5的影响因素权重确定方法[J].广东技术师范学院学报,2016,37(11):25-28,52.

[9] 杨淑莉.主成分分析法在学生成绩评价中的应用[J].数学的实践与认识,2012,42(16):103-112.

[10] 王靓钰,夏其乐,陈剑兵,等.基于主成分分析的不同品种柑橘制汁适应性研究[J].果树学报:1-17.

[11] 陈真,马细霞,张晓蕾.基于PCA和AHP的小流域山洪灾害风险评价[J].水电能源科学,2018,36(11):56-59.

[12] 舒天竹,王晓红.基于3S技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J].水土保持研究,2017,24(04):127-132.

(责任编辑 唐定国)