

基于 DEM 的废弃矿山小流域地形特征分析

杨翠霞^{1,2}, 赵廷宁¹, 刘育成², 谢宝元¹, 张成梁³, 张 华¹

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 大连工业大学, 辽宁 大连 116034; 3. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089)

摘 要: 以北京市某废弃采石场的小流域地形为研究对象, 对分辨率为 0.3~7 m 的栅格 DEM 分别进行小流域参数和地形参数的提取和分析。结果发现, 利用不同分辨率 DEM 提取的河网形态结构有显著差异, 网格尺寸 7, 4 和 3 m 的河网结构与 2, 1, 0.7, 0.5, 0.4 和 0.3 m 的河网结构有显著差异, 二者主河道位置变化明显, 但流域面积、河道长度及比降、平均坡度和高程参数相差不大, 而河道总长度和河网密度参数相差较大。根据分析结果确定 DEM 的比较适宜的分辨率为 0.5 m, 在此基础上利用主成分分析法得出高程和坡度为主成分。对研究区设置 20°, 25°, 30° 和 35° 的 4 个不同坡度的标准径流小区, 观测日降雨量、坡度、径流量和土壤侵蚀量并分析和计算它们之间关系式, 计算出整个流域在不同坡度分级及不同雨量级的平均径流量和土壤侵蚀量。研究成果对于废弃矿山修复和生态重建具有参考价值。

关键词: DEM; 矿山废弃地; 流域特征; 径流量; 土壤侵蚀量

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)03-0170-05

中图分类号: P208, TD88

Landform Characters of a Small Abandoned Quarry Watershed Based on DEM

YANG Cui-xia^{1,2}, ZHAO Ting-ning¹, LIU Yu-cheng², XIE Bao-yuan¹, ZHANG Cheng-liang³, ZHANG Hua¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 3. Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China)

Abstract: Taking an abandoned quarry watershed in Beijing City as the research object, the parameters of watershed and landform were extracted and analyzed using the raster DEM at the different resolutions from 0.3 to 7 m. Results showed that the morphological structure of drainage networks extracted from the different resolution DEMs had significant differences. The structures of drainage networks had significant differences between the two sets of grid size; one was with 7, 4 and 3 m and the other was with 2, 1, 0.7, 0.5, 0.4 and 0.3 m. Positions of the two main channels changed dramatically. But there was no marked qualitative difference among drainage area, channel length and gradient, average slope and elevation. The difference was obvious between the total channel length and drainage density. According to the results, the optimal resolution of DEM was estimated to be 0.5 m. The main components, i. e., elevation and slope, were obtained using the PCA (principal component analysis). By setting four runoff plots of 20°, 25°, 30° and 35° in the research area, the relationships among rainfall, slope, runoff and soil erosion were analyzed and obtained. Then, the average runoff and soil erosion of the whole drainage basin were computed for different slope grades and rainfall levels. The research results can provide reference for the restoration and ecological reconstruction of abandoned quarry.

Keywords: DEM; abandoned quarry; watershed feature; runoff; soil erosion

数字高程模型 (DEM) 在流域方向的研究越来越受到重视, 大多数的研究集中于不同分辨率对流域特征参数的影响, 例如区域水土流失的地形因子^[1-2]、黄土高原坡度精度研究及其沟壑区典型小流域 DEM

收稿日期: 2012-12-12

修回日期: 2013-01-03

资助项目: 林业公益性行业科研专项“建设工程损毁林地植被修复关键技术研究及示范”(200904030); 北京市科学技术研究院创新工程“矿山生态修复工程技术研究及试验平台建设”(PXM2012-178203-000002)

作者简介: 杨翠霞(1976—), 女(汉族), 河南省禹州市人, 博士, 讲师, 研究方向为工程绿化与 GIS 应用的景观重建研究。E-mail: ycuixia@126.com。

通信作者: 谢宝元(1948—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与工程绿化研究。E-mail: xie4412@sina.com。

高精度提取^[3-4],不同尺度和分辨率对地形参数和流域特征参数预测结果的影响研究^[5-9]等。其主要研究结果为:不同分辨率 DEM 提取的河网结构、流域面积、河道长度、平均高程等差异性不大,而平均坡度及与坡度有关的参数差别较大。近年来,矿山废弃地生态恢复和重建研究也正从单一地研究矿山恢复策略及植被演替^[10-11]、土壤改良^[12]、工程措施^[13]等,向与地形整理相结合的方向发展,但是涉及 DEM 对废弃矿山小流域地形特征的影响分析研究相对较少。矿山废弃地的生态重建和恢复,最终结果主要是受地形或改造地形的影响^[14]。利用 GIS 技术和矿山废弃地生态修复与重建相结合,在经济性的前提下精确找出矿山复垦重要区域及地形因子指标,并为矿山废弃地的生态修复规划设计和后期复垦工程施工提供参考和依据。为此,本文以位于北京市房山区周口店的某采石场作为研究对象,对不同分辨率 DEM 条件下废弃采石场的流域特征参数和地形复合参数进行了提取与分析,并结合地形对研究区的降雨量和产流产沙进行计算和分析。

1 研究区概况

研究区位于北京市房山区周口店镇建设工程损毁林地植被修复试验示范区,以北纬 $39^{\circ}40'52''$,东经 $115^{\circ}54'31''$ 为中心,海拔约 124 m,面积约为 2.4 km^2 。属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温 $4\sim 11.7^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量 655 mm,年降水量分布不均,6—8 月降雨量占全年降水量的 80% 以上。土壤为废弃采石场渣土,质地为多砾石砂壤土。属于太行山石质山区的低山丘陵地貌,以石灰岩为主。天然植被覆盖率低,主要有黄花蒿 (*Artemisia annua* L.)、高羊茅 (*Festuca arundinacea*)、野瑞香 (*Ternstroemia gymnanthera*)、委陵菜 (*Potentilla aiscolor* Bunge) 和火炬树 (*Rhus typhina* Nutt) 等。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

将用 Topcon 影像全站仪测量的点导入 ArcGIS 9.3 中,采用北京 1954 投影坐标系,在空间分析模块下将坐标转换后的点图层生成不规则三角网 TIN 格式(图 1),根据实地测量和现场的比对和校正,再由不规则三角网 TIN 内插生成规则栅格 DEM,分别生成网格尺寸为 0.3,0.4,0.5,0.7,1,2,3,4,5 和 7 m 共 10 种水平分辨率的栅格 DEM。

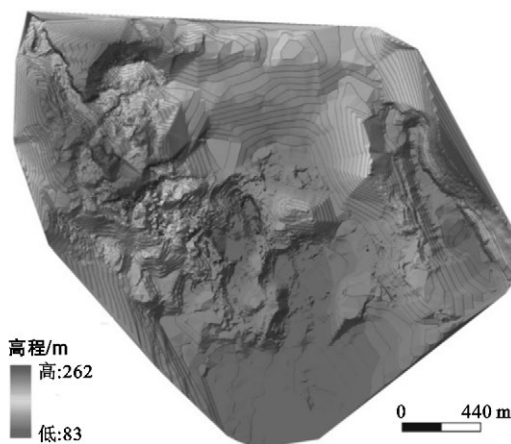


图 1 研究区原始 TIN 图

现场选择 4 个相对平整的直型坡面设置 4 个 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 标准径流小区,坡度分别为 20° , 25° , 30° 和 35° ,开展坡面尺度的地面径流和泥沙观测,四周用石棉瓦隔离,以防小区径流的流出和区外径流的流入,底部安装径流桶以收集径流和泥沙。

2.2 研究方法

(1) 利用 ArcGIS 的水文分析模块,选取在地形和水文分析中常用的流域面积、河网密度、河网结构、河道长度及坡度、平均高程和平均坡度等参数进行提取和分析。对 DEM 的处理,基于最陡坡面流模拟方法、利用 D 8 算法和最小汇流累积阈值的概念,对不同网格尺寸分别进行流域特征分析,根据数据找出最佳的网格尺寸作为废弃矿山的地形特征分析的分辨率。

(2) 利用主成分分析方法,对地形分析中常用的高程、坡度、起伏度、地表切割度和粗糙度 5 个参数进行提取和分析。为消除各指标量纲间的不一致性,对数据进行归一化处理,数值介于 $0\sim 1$ 。在 GRID 模块下,运行 Princomp 函数,完成主成分分析,并对主成分进行重分类。结合标准径流小区实测结果,进行产沙产流计算分析,为矿山修复与生态重建提供核心数据。

(3) 日降雨量由 Vantage Pro 2 自动气象站采集,根据日降雨量的等级划分,日降雨量在 10 mm 以下为小雨,日降雨量 $10\sim 24.9 \text{ mm}$ 为中雨,日降雨量在 25 mm 以上的为大到暴雨。采用坡面径流小区观测法,对每场产流降雨及时取样分析,记录径流桶中的径流高度和土壤侵蚀量^[15],最后利用 SPSS 对不同日降雨量及坡度的径流量和土壤侵蚀量进行回归分析和计算。

3 结果与讨论

3.1 研究区流域特征参数分析

3.1.1 流域面积 流域面积是衡量河流大小的重要指标,也直接影响径流的过程。表 1 为在不同网格尺寸提取样区的流域面积变化情况,算术平均值为 2.40 km^2 ,标准差为 0.01;以提取的流域面积为标准,计算出不同网格大小提取的流域面积的变化范围为 $0.01\% \sim 0.65\%$ 。

表 1 研究区的流域特征参数

栅格尺寸/m	0.30	0.40	0.50	0.70	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	7.00
流域面积/ km^2	2.39	2.39	2.39	2.39	2.39	2.40	2.40	2.40	2.40	2.42
高程平均值/m	148.74	148.75	148.76	148.77	148.77	148.81	148.86	148.90	148.95	149.05
高程标准差	40.49	40.50	40.50	40.49	40.49	40.49	40.48	40.47	40.46	40.49
平均坡度/ $^\circ$	17.77	17.71	17.64	17.54	17.38	17.02	16.75	16.53	16.33	15.98

3.1.2 研究区平均高程和平均坡度 高程是流域地形特征的主要表征对象,平均高程表示了流域范围内的平均高度。

从表 1 中的高程平均值来看,不同网格尺寸之间的高程最大偏差为 0.10 m,变化范围为 $0.01\% \sim 0.69\%$,平均高程的算术平均值为 148.84 m,标准差为 0.10,这主要是由于网格尺寸的增大引起试验区地形的坦化。由表 1 中高程标准差可以看出,不同网格尺寸之间的变化不大,最大偏差为 0.01 m,变化范围为 $0.01\% \sim 0.09\%$ 。

坡度对流域地表径流的产生、集流、下渗以及土壤流失和河流含沙量等均有重大影响,也是流域汇流快慢、水能蕴藏状况和侵蚀条件的重要指标之一。不同网格尺寸的坡度提取都是在 3×3 窗口中进行的,从表 1 中的平均坡度可得出,总体上算术平均值为 17.07° ,标准差为 0.64,最大偏差为 0.36° ,变化范围为 $0.34\% \sim 2.07\%$,同时随着网格尺寸的变大,平均坡度呈减小趋势,这是由于分辨率的降低对流域地形起到削高垫平作用。

从表 1 的流域面积和计算结果看出,不同水平分辨率 DEM 提取的流域面积稍有差异,随着网格的增大,流域面积呈现出增大的趋势。网格尺寸 1 m 处是变化的突变点,从网格小于 1 m 提取的流域面积几乎没有差别,从网格大于 1 m 提取的流域面积增大趋势明显。分析其原因,研究区地形崎岖不平,网格的增大对流域地形起到了坦化作用,加上流域边界处栅格流向的不确定性,导致提取的流域边界的一致。

3.1.3 河道总长度和河网密度 河道总长度是干支流的总长度,对流域水文过程中河网汇流量的确定具有重要意义。从图 2a 可得出,随着网格尺寸变大,提取的河道总长度呈减小趋势,总体算术平均值为 27.41 km,标准差为 8.63,变化范围最大偏差为 7.12 km,偏差幅度为 17.84%。虽然在进行水文分析时采用 D8 法确定流向,但网格大小不同,河道路径也异同;另一方面由于地形支流发育于地形变化复杂地区,不同地区栅格流向受到的影响程度也不同,导致河道总长度的变化。

河网密度是河道总长度和流域面积之比,用于描述水系发育和河流的疏密程度。图 2b 为从 DEM 中提取的河网密度,总体平均值为 $11.45 \text{ km}/\text{km}^2$,标准差为 3.63,变化范围最大偏差为 $2.98 \text{ km}/\text{km}^2$,偏差幅度为 17.85%。

从图 2 上可以看出,河网密度变化趋势与河道总长度的变化趋势大体一致,这主要是由于不同网格尺寸提取的流域面积差异小,因而对河网密度的影响不大。

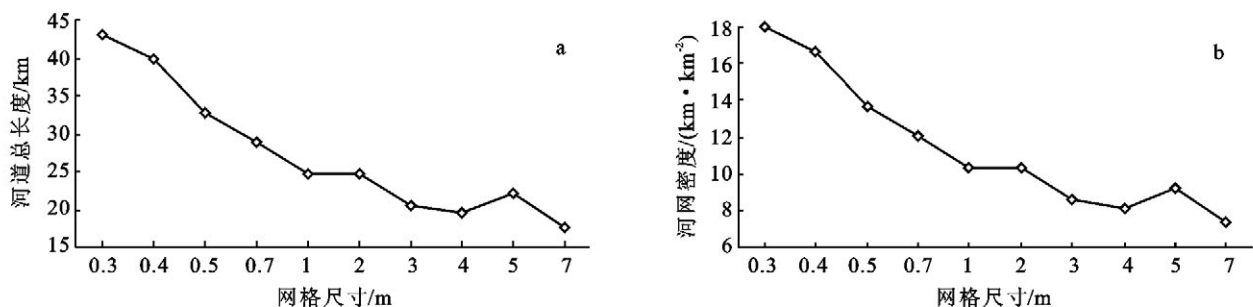


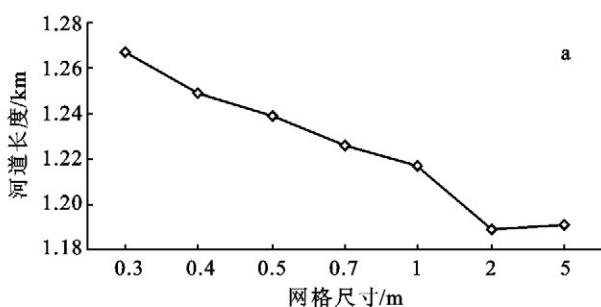
图 2 河道总长度(a)和河网密度(b)随网格尺寸的变化

试验区的地形不是天然形成,而是以废弃土为主的土石人工堆积的地形,复杂多变,导致在相同的汇流累积阈值下随着网格尺寸的变化,河网形态结构有明显的差异。尤其是主河道的位置发生改变,很明显的特征如下:一类是网格尺寸为 0.3,0.4,0.5,0.7,1 和 2 m 的河网形态结构与网格尺寸为 5 m(图 3a)的无显著差异;另一类为网格尺寸为 3,4 m 的河网形态结构与 7 m(图 3b)无显著差异。同时与真实河网相对比,网格尺寸为 5 m 的河网形态比较接近真实河网。



图 3 网格尺寸为 5 m(a)和 7 m(b)的河网形态

3.1.4 河道长度和河道比降 河道长度为自河源沿



干流到流域出口的流程长度,是确定河流落差、汇流时间、河流流量和比降的重要参数;河道比降是高程沿河道长度的变化率,也是计算水流流速和影响产汇流特性的重要因素。根据前面对河网形态结构的分析,在相近似河网形态的条件下,河道长度和河道比降的对比选用网格尺寸分别为 5,2,1,0.7,0.5,0.4 和 0.3 m 来提取和计算。从图 4a 中可以看出,随着网格尺寸增加,提取的河道长度呈减小趋势;总体上河道长度算术平均值为 1.23 km,标准差为 0.03,变化范围最大偏差为 0.03 km,偏差幅度为 2.34%。分析其原因,网格尺寸大小的变化会导致网格流向和河道起始点的空间位置会发生相应的改变,从而引起河道长度的变化,这也反映了流域地形细部特征的不同。

对于河道比降而言,受 D 8 算法限制,随着 DEM 网格尺寸的增大,提取的河道比降整体上呈增大趋势(图 4b),在网格尺寸为 0.5 m 的比降为突变点,比降变化范围最大偏差为 0.19%,偏差幅度为 9.17%,总体算术平均值为 2.02%,标准差为 1.09。所以产生这种变化的原因是由于试验区的 DEM 和河道起点不同相互作用从而导致起点高程的不同而引起的。

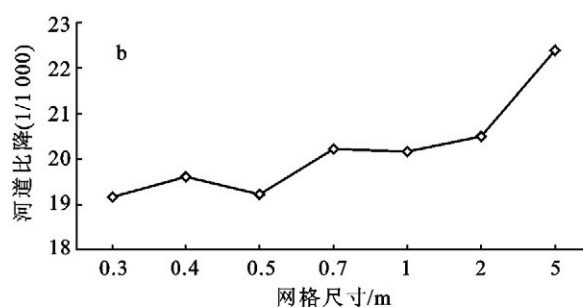


图 4 河道长度(a)和河道比降(b)变化

一般来说 DEM 网格越小,越能更详细地反映实际地形的变化,但考虑到 DEM 数据精度的限制和前面研究区的流域特征参数的对比分析,尤其是河道比降在 0.5 m 出现拐点,所以本研究区流域特征分析比较适宜的网格尺寸为 0.5 m,对研究区的地形参数和有关径流参数进行分析也选用 0.5 m 分辨率的 DEM。

3.2 研究区地形参数主成分分析

在 0.5 m 栅格尺寸的 DEM 中对地形参数高程、坡度、起伏度、地表切割度和粗糙度利用 3×3 窗口分别提取,并对数据结果归一化为 0~1。再利用 Princomp 函数,提取和计算出主成分的特征值及累计贡献率,前 2 个主成分的累积贡献率达 87.93%,所以前 2 个主成分高程和坡度为主成分。在对主成分的数

据进行重分类时,坡度采用水土保持工作中普遍采用的临界坡度分级标准和地形本身特点作为基本的分级方案^[3],本文将坡度分级为:0°~5°,5°~10°,10°~15°,15°~20°,20°~25°,25°~30°,30°~35°,35°~40°,40°~45°和 45°~90°共 10 级(表 2),并计算出相应坡度所占的面积比。这为后期的流域径流量和产沙量的计算也提供了依据。

3.3 研究区地表径流量和土壤侵蚀量的分析

根据观测记录,2011 年 6—8 月径流小区共产流 10 次,测得的小雨平均雨量为 1.78 mm,中雨为 75.74 mm,大到暴雨为 67.22 mm。对不同坡度 20°,25°,30°和 35°的径流深和土壤侵蚀量进行 SPSS 的回归分析,得到径流深、日降雨量和坡度之间的方程:

$$H = 0.028p + 0.065\beta - 0.659 \quad (1)$$

式中: H ——径流深(mm); p ——日降雨量(mm);
 β ——坡度($^{\circ}$)。下同。

得到土壤侵蚀量、日降雨量和坡度之间的方程:

$$S=50.6p+65.3\beta+108.9 \quad (2)$$

式中: S ——单位面积侵蚀量(kg/hm^2)。

利用方程(1)和表 2 中的坡度分级,计算出相应的不同雨量级的平均径流深如表 2 所示, 15° 以下的坡度占总面积的 54.61%,随着坡度的增加,径流量呈线性增加; $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的中小雨的径流量为 0,这与研究

区的地貌和植被稀疏关系比较大。根据方程(2)和坡度分级,计算出不同坡度分级的土壤流失量(表 2),按照面积加权平均,计算得出降雨强度为小雨时研究区单位面积平均土壤流失量为 13.45 kg,中雨时为 20.51 kg,大到暴雨时为 41.51 kg。同时也得出研究区的总土壤流失量,当降雨强度为小雨时研究区的土壤流失量为 3.0×10^5 kg,中雨时为 3.5×10^5 kg,大到暴雨时为 7.1×10^5 kg。随着降雨的增大,土壤流失量更大,因此废弃矿山的植被恢复非常重要。

表 2 不同坡度分级,不同雨量分级下的平均径流深和土壤侵蚀量

坡度分级		$0^{\circ}\sim 5^{\circ}$	$5^{\circ}\sim 10^{\circ}$	$10^{\circ}\sim 15^{\circ}$	$15^{\circ}\sim 20^{\circ}$	$20^{\circ}\sim 25^{\circ}$	$25^{\circ}\sim 30^{\circ}$	$30^{\circ}\sim 35^{\circ}$	$35^{\circ}\sim 40^{\circ}$	$40^{\circ}\sim 45^{\circ}$	$>45^{\circ}$
坡度分级所占面积比/%		18.27	18.61	17.73	11.76	9.53	6.65	5.35	3.79	2.17	6.12
平均径流深/ mm	小雨	0.00	0.04	0.20	0.53	0.85	1.18	1.50	1.83	2.15	2.97
	中雨	0.00	0.27	0.59	0.92	1.24	1.57	1.89	2.22	2.54	3.36
	大到暴雨	1.39	1.71	2.04	2.36	2.69	3.01	3.34	3.66	3.99	4.80
土壤侵蚀量/ 10^3 kg	小雨	11.31	21.91	30.76	26.97	27.18	22.69	21.24	17.14	11.05	39.67
	中雨	33.36	44.38	52.16	41.16	38.69	30.72	27.70	21.72	13.67	47.06
	大到暴雨	98.92	111.17	115.76	83.35	72.89	54.59	46.91	35.31	21.47	69.02

4 讨论

(1) 不同网格尺寸 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1, 2, 3, 4, 5 和 7 m 的废弃矿山 DEM 流域面积、平均坡度、平均高程、河道长度和河道比降相差不大,而河道总长度和河网密度参数相差较大。网格越小,提取的河网结构与实际河网相近程度越高,描述得也越详细;随着网格的增大,DEM 只能反映流域的全局特征,不能反映局部的细节特征,尤其是在平坦地区和洼地区域,网格的增大使得流向的不确定性增大,使得不同流向间有很大的偏差。

(2) 由于研究区地形是以采石场的废弃土为主的土石堆积的地形,地形崎岖多变。在不同网格尺寸 DEM 提取的河网形态结构有显著差异,网格尺寸 7, 4 和 3 m 的河网结构与 5, 2, 1, 0.7, 0.5, 0.4 和 0.3 m 的有显著差异,二者主河道位置发生明显变化,后者的河网结构比较接近实际的地形水系。所以对矿山废弃地的地形分析尤其是现有河网分析时,要多分析不同分辨率下的河网结构,以便找出比较接近真实的实际水系。

(3) 对比流域特征参数数据和 DEM 数据精度的限制,本研究区选定 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 栅格网格尺寸最为最佳分辨率。在此基础上利用主成分分析法和层次分析法对地形参数高程、坡度、地形起伏度、粗糙度和地形切割度进行主成分提取和计算,高程和坡度为主成分,并对坡度按 5° 间隔分为 10 级,这对于废弃矿山的规划及生态修复、土地利用规划、水文过程分析和土壤侵蚀计算都有重要的意义。

(4) 在研究区设置 4 种不同坡度的标准径流小区,进行主要雨季小区地表径流量和土壤侵蚀量的观察和计算,得出降雨强度、坡度与平均径流深和土壤侵蚀量的关系式,由此估算出不同坡度分级的平均径流深和土壤侵蚀量,这为后期治理水土流失和植被恢复提供了依据。

(5) 上述结论由于数据限制(仅对废弃采石场的地形)而有一定的局限性,若要得出一般性结论,需对其他类型矿山废弃地如煤矿等进行比较分析。

[参 考 文 献]

- [1] 刘新华,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): 57-59.
- [2] 杨勤科,赵牡丹,刘咏梅,等. DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界, 2009(1): 25-31.
- [3] 汤国安,杨勤科,张勇,等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究:以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53-56.
- [4] 王鸿斌,刘斌,田杏芳,等. 黄土高原沟壑区典型小流域高精度 DEM 制作及其应用研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 34-36.
- [5] Valeo C S, Moin M A. Grid-resolution effects on a model for integrated urban and rural areas[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(14): 2505-2525.
- [6] Kenward T, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3): 432-444.

(下转第 196 页)

贞、垂柳、紫薇、龙柏、大叶黄杨、三叶草、马唐、狗牙根、狗尾草、铁杆蒿、芦苇、菵草、反枝苋、浮萍。这说明杨树、女贞、垂柳、紫薇、龙柏、大叶黄杨是徐州地区省道绿化的主要植物种类,而草本群落无系统绿化,除了三叶草之外,均为自然恢复的结果。两两省道的相似性指数均大于 30%,这说明 4 条省道的绿化存在较大的相似性,但主要是草本植物的共有种起着重要作用,4 条省道两两之间的相似性指数均没有超过 50%,说明每条省道在绿化模式上存在着一定差异。从调查结果可看出,徐州地区省道的绿化模式随意性较大,没有经过系统规划和设计,特别是乡村地区的国道绿化基本上以自然恢复为主。

(4) 通过对 4 条省道的多样性分析可以看出, S322, S253, S251 灌木种类偏少,杂草丛生,迫切需要进行道路绿化,增加灌木多样性。在进行道路绿化的过程中,需要乔灌木统一考虑,特别是增加草本植物的多样性以抑制杂草生长,增强道路的景观性。在进行调查中发现泡桐、苦楝、构树等乡土树种只在远离城市的偏远乡村才有,而且离城市越远,植物种类越单一、多样性越低。城市化对公路绿化产生了重要影响,有待于以后的深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] Xu Xianli, Zhang Keli, Kong Yaping. Effectiveness of erosion control measures along the Qinghai—Tibet highway, Tibetan plateau, China[J]. Transportation Research Part D, 2005(11):302-309.
- [2] Forman R T T. Estimate of the area affected ecologically by the road system in the United States[J]. Conservation Biology, 2000(14):31-35.
- [3] Jeannine T M, Mark T S. The establishment success of native versus non-native herbaceous seed mixes on a revegetated roadside in Central Texas[J]. Ecological Engineering, 2006(26):231-240.
- [4] 严岳鸿,何祖霞,苑虎,等. 坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响[J]. 生物多样性, 2011,19(1):41-47.
- [5] 田怀珍,邢福武. 南岭国家级自然保护区兰科植物物种多样性的海拔梯度格局[J]. 生物多样性, 2008,16(1):75-82.
- [6] 方世杰,舒安平. 半干旱区高速公路路域生态恢复工程植物多样性特征[J]. 公路交通科技, 2009,26(6):153-158.
- [7] 陈建业,陆旭东,王侗. 长白山区公路对路域植物物种组成及多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2010,19(2):373-378.
- [8] 朱晓勇,胡海波,鲁小珍,等. 太湖西区公路两侧植物物种多样性的研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006,30(3):85-88.
- [9] 何汉杏,何秀春. 湖南舜皇山常绿阔叶林种类组成数量综合特征: II. 灌木、草本物种重要值[J]. 中南林学院学报, 2004,24(1):23-26.
- [10] 温璐,董世魁,朱磊. 环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响[J]. 生态学报, 2011,31(7):1844-1854.
- [11] 谭雪红,魏东,李林英,等. 山区公路边坡自然恢复与人工恢复的比较研究[J]. 公路, 2010(5):169-172.
- [12] Davide G B. Biodiversity impact assessment of roads and approach based on ecosystem rarity[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003,23(3):343-365.
- [13] 廖飞勇. 风景园林生态学[M]. 北京:中国林业出版社, 2010:152-156.
- [7] 吴险峰,刘昌明,王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报, 2003,18(2):148-154.
- [8] 王培法. 栅格 DEM 的尺度与水平分辨率对流域特征提取的分析:以黄土岭流域为例[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2004,28(6):549-554.
- [9] 易卫华,张建明,匡永生,等. 水平分辨率对 DEM 流域特征提取的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2007,23(2):34-38.
- [10] Duan Wenjun, Ren Hai, Fu Shenglei, et al. Natural recovery of different areas of a deserted quarry in South China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008,20(4):476-481.
- [11] 袁剑刚,周先叶,陈彦,等. 采石场悬崖生态系统自然演替初期土壤和植被特征[J]. 生态学报, 2005,25(6):1517-1522.
- [12] Oliveira G, Nunes A, Clemente A, et al. Effect of substrate treatments on survival and growth of Mediterranean shrubs in a revegetated quarry: an eight-year study[J]. Ecological Engineering, 2011,37(2):255-259.
- [13] Maisto G, Marco A, Nicola F, et al. Suitability of two types of organic wastes for the growth of sclerophyllous shrubs on limestone debris: a mesocosm trial[J]. Science of the Total Environment, 2010,408(7):1508-1514.
- [14] Toy T J, Hadley R F. Geomorphology of disturbed lands[M]. New York: Academic Press, 1987.
- [15] 左长清,胡根华,张华明. 红壤坡地水土流失规律研究[J]. 水土保持通报, 2003,17(6):89-91.

(上接第 174 页)