

闫石,朱国庆,王党朝,等.半干旱煤矿排土场边坡侵蚀与植物配置关系[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(3):7-13. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.002

YAN S,ZHU GQ,WANG DC, et al. The Relationship Between Slope Erosion and Plant Configuration in Semi-arid Coal Mine Drainage Field[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(3):7-13. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.002

半干旱煤矿排土场边坡侵蚀与植物配置关系

闫石¹,朱国庆^{2,3*},王党朝¹,卢洁³,尚志¹,忠程伟³,刘峰⁴,王维忠⁴,李娟⁴

(1.神华北电胜利能源有限公司,内蒙古 锡林浩特 026015;2.济南市勘察测绘研究院,山东 济南 250000;
3.中国矿业大学 矿山生态修复教育部工程研究中心,江苏 徐州 221116;4.准格尔旗矿区环境恢复治理中心,内蒙古 准格尔旗 017100)

摘要:煤矿排土场进行生态修复要考虑复垦成本,为探究水土保持效益最高的植物配置模式,以胜利矿区南排土场复垦区内不同植物配置的3个代表性区域为监测对象.采用无人机遥感技术,掌握监测区的植被高度、植被盖度及叶面积指数等参数信息,并提取监测区的土壤侵蚀量,得到边坡侵蚀与植物配置的关系.结果表明:边坡植被盖度与土壤侵蚀模数有很强的负相关性, $R=0.843$,抗土壤侵蚀边际效益最高的区间为30%~40%植被覆盖度,侵蚀控制能力与灌木和多年生草本的比例呈正相关关系,由此得出监测区的最优植被配置,从而为确定合适的优势物种及植被覆盖度、排土场水土流失防治提供理论依据.

关键词:无人机遥感;植被覆盖;土壤侵蚀;排土场复垦

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0007-07

The Relationship Between Slope Erosion and Plant Configuration in Semi-arid Coal Mine Drainage Field

YAN Shi¹, ZHU Guoqing^{2,3}, WANG Dangchao¹, LU Jie³, SHANG Zhi¹,
ZHONG Chengwei³, LIU Feng⁴, WANG Weizhong⁴, LI Juan⁴

(1. Shenhua BeidianVictory Energy Company Limited, Xilinhot 026015, China; 2. Jinan Institute of Surveying and Mapping, Jinan 250000, China;
3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
4. Environmental Recovery and Governance Center of Zhungeer Banner Mining Area, Zhungeer Banner 017100, China)

Abstract: Ecological restoration of the drainage field should consider the cost of reclamation, in order to find out the plant configuration mode with the highest soil and water conservation benefit, the three representative areas of different plant configuration in the southern drainage field reclamation of the Victory Mining Area should be monitored. Using the remote sensing technology of the drone, the information of the parameters, such as vegetation height, vegetation cover and leaf area index of the monitoring area is obtained, the soil erosion amount of the monitoring area is extracted, and the relationship between slope erosion and plant configuration is obtained. Results show that there is a strongly negative correlation between slope vegetation coverage and soil erosion modulus, $R=0.843$, the highest marginal benefit of soil erosion resistance is 30%~40% vegetation coverage, and the erosion control ability is related to shrubs and perennials. From this, the optimal vegetation configuration

收稿日期:2021-01-18

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0501107)

*通信作者,E-mail: gq.zhu@cumt.edu.cn

in the monitoring area is obtained, thus providing the theoretical basis for determining the suitable vegetation cover of the dominant species and vegetation.

Keywords: remote sensing of drones; vegetation cover; soil erosion; reclamation of drainage fields

国内学者研究得出植被覆盖可以有效增加土壤孔隙度并降低土壤容重^[1],在相同冲刷强度和时间内,植物根系能显著减少土壤侵蚀^[2].半干旱露天矿区边坡植被建设是矿区土地复垦的重点工作,也是减少露天采矿活动诱发边坡土壤侵蚀和边坡失稳的重要手段.由于半干旱地区水分承载力以及复垦成本等限制问题,排土场边坡植被合理覆盖度及其植物优化配置则是科学开展边坡植被建设的重要原则,其关键需要掌握特定环境下排土场边坡侵蚀与植物配置之间的规律关系.一方面需要准确掌握排土场边坡植被覆盖度及其植物配置特征,另一方面需要对不同植被覆盖区土壤侵蚀发育特征进行定量描述.

目前,相关研究有基于 USLE, WEPP 等专业土壤侵蚀模拟软件的数值模拟研究^[3-5],也有针对特定地区土壤类型的边坡侵蚀现场径流观测或相似物理模拟实验^[6].但是这些传统的植被样方观测手段或地表径流站跟踪观测或单一视角的现场监测难以准确描述边坡植物配置与土壤侵蚀数量之间的定量关系,也就无法给出指导排土场边坡植被建设的具体参数或指标.

无人机遥感技术具有低成本、易操作、高精度等特点,逐渐在林业、水利、土地调查等各领域取得了广泛的应用.宫传刚^[7]等凭借随机点和剖面线对比 GPS 和 RTK 的已有测量地形数据,在地形复杂多变区通过修正 DEM 数据能够更好地展示真实地形的细节;Martín Duque^[8]基于 2 次地形的 DEM 差值计算矿区尾矿坝的土壤侵蚀量;李恒^[9]等研究的排土场地形重塑方法不仅适用于排土场坡形设计,也解决了矿区边坡植被配置的复垦地形设计问题,利用无人机遥感技术为定量提取土壤侵蚀量提供了一定的参考.

因此,为探索半干旱草原区露天煤矿排土场的植物配置与土壤侵蚀之间的关系及方法,以内蒙古胜利煤矿排土场边坡为研究区,采用超低空无人机监测研究植被覆盖度、植物配置与边坡侵蚀的定量关系,寻求排土场边坡植被最优配置方法,从而为排土场的科学复垦提供依据.

1 研究区概况

胜利一号露天煤矿监测区位于内蒙古锡林浩特市(见图 1),总体是东北-西南条带形状展布,南排土场共有 5 个高 15 m 的台阶,该煤矿位于半干旱气候的草原地区,胜利矿区平均走向长 45 km,倾向平均宽 7.6 km,排土场最高点海拔 1 040 m.监测区的排土场作为一种人工松散堆积体,不均匀沉降使其孔隙分布独特,从而导致其水土流失情况会更加严重^[10].

该排土场绿化已全部完成,复垦面积是 253 hm²,其中平盘面积为 183.9 hm²,坡面面积为 69.1 hm².根据排土场边坡覆盖类型特征,共选择了 3 个代表性监测区,如图 1 中的黄色框区域所示.监测区一号位于存在大量裸露岩土在南排东北角,该监测区域有大量的细沟侵蚀发生;监测区二号位于植物种类较单一的南排西北角,该监测区域有伴生沟侵蚀的现象发生;监测区三号靠近植物种类较丰富的南排东南角,该监测区域存在有梯度植被覆盖度的现象.

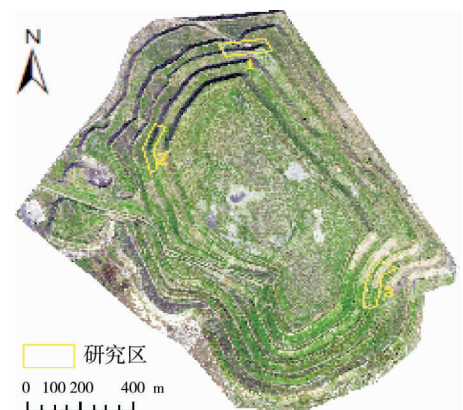


图 1 监测区位置

2 边坡植被信息提取

2.1 植被样方调查

实验采用大疆无人机中的精灵 3 作为影像数据采集平台,多光谱获取所使用的传感器为 Parrot Sequoia 相机,该传感器搭载后能够获得实验所需的监测区高质量植被多光谱影像.在数据采集前对无人机飞行参数进行设计,为减少无人机转向次数,飞行方向以沿排土场边缘方向为航向,根据监测区地形结合搭载 Sequoia 相机的设定标准,设定旁向重叠度和航向重叠度分别为 75% 和 80%,飞行高度为 30 m.

野外选点与样本采集每个监测区均匀布设 9 个左右的控制点,其中一半控制点落在监测区的边角附近.设置样方为 $50 \times 50 \text{ cm}^2$ 的正方形,在监测区内利用数码照相机法^[11]实际测量了样方的植被覆盖度累计 16 个.

2.2 植被特征参数模型的构建

1)采用线性回归的拟合方法,从多光谱遥感数据提取的常用植被指数中选取^[12],统计各样方植被指数的期望值,与实际测量的植被覆盖度相关性分析得到 Pearson 相关系数(见表 1),在表 1 中的几个植被指数中,最后确定比值植被指数(RVI)的幂函数模型表达式为相关性最高, R^2 为 0.772.

表 1 各植被指数(x)与植被覆盖度(y)的相关关系

植被指数	Pearson 相关系数	关系式	R^2
土壤调整指数(SAVI)	0.847 **	$y = 1.525 7x^{1.341 6}$	0.736 7
垂直植被指数(PVI)	0.668 *	$y = 2.098 3x^{1.150 4}$	0.562 4
归一化植被指数(NDVI)	0.865 **	$y = 1.038 4x^{1.831 8}$	0.716 2
比值植被指数(RVI)	0.883 **	$y = 0.076 5x^{1.148 2}$	0.771 5

注: ** 表明 0.01 水平上显著相关, * 表明 0.05 水平上显著相关^[13]

2)利用回归分析方法构建模型,获取各监测区的植被覆盖度和叶面积指数(LAI)的情况,计算得到模型与植被覆盖度(VFC)的相关性为 0.771 5,其函数关系式为

$$VFC = 0.076 5RVI^{1.148 2} \tag{1}$$

叶面积指数模型的函数关系式为

$$LAI = 0.148 9RVI - 0.349 6 \tag{2}$$

3 个监测区的植被覆盖度和叶面积指数反演如图 2 和图 3 所示.

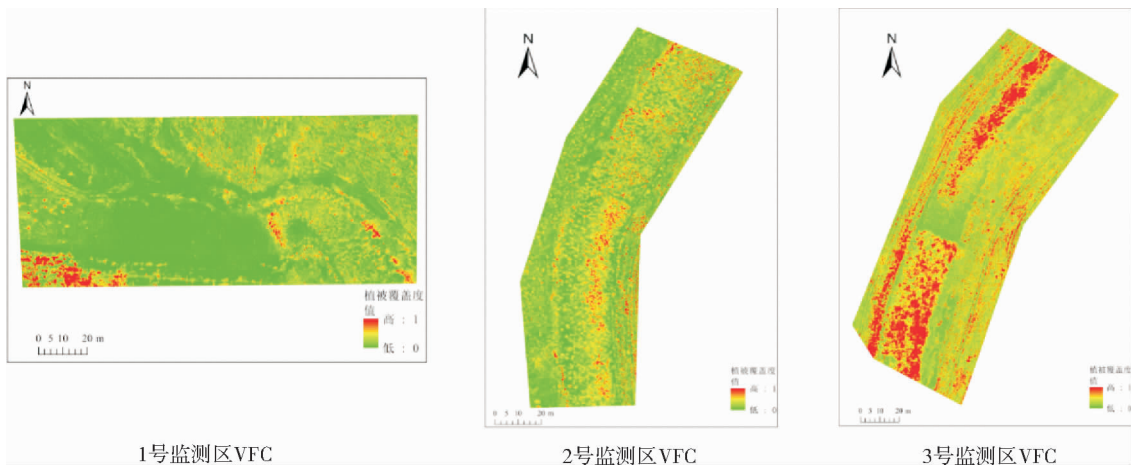


图 2 各监测区植被覆盖度

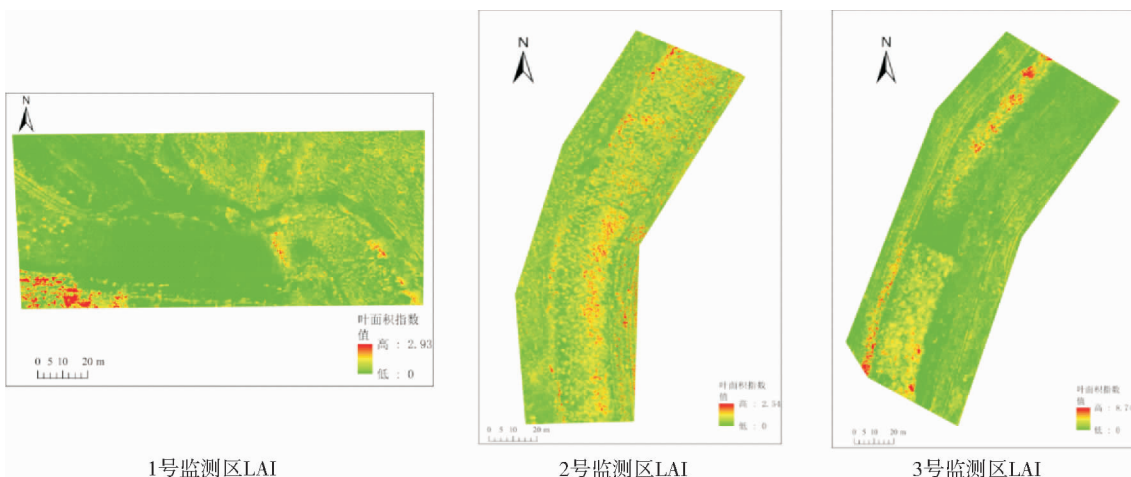


图 3 叶面积指数

3)为构建监测区的植被高度模型,利用无人机获取监测区域的高程信息 DSM,通过选取关键地面点,与无人机地面高程(DEM)获取相结合来提取研究区的DEM,得到接近真实地表的DEM.将DEM,DSM代入公式即可得到研究区内植被高度模型(CSM),植被高度数据模型求取的基本原理如式3所示,得到监测区植被高度的数据模型(见图4).

$$CSM = DSM - DEM. \tag{3}$$

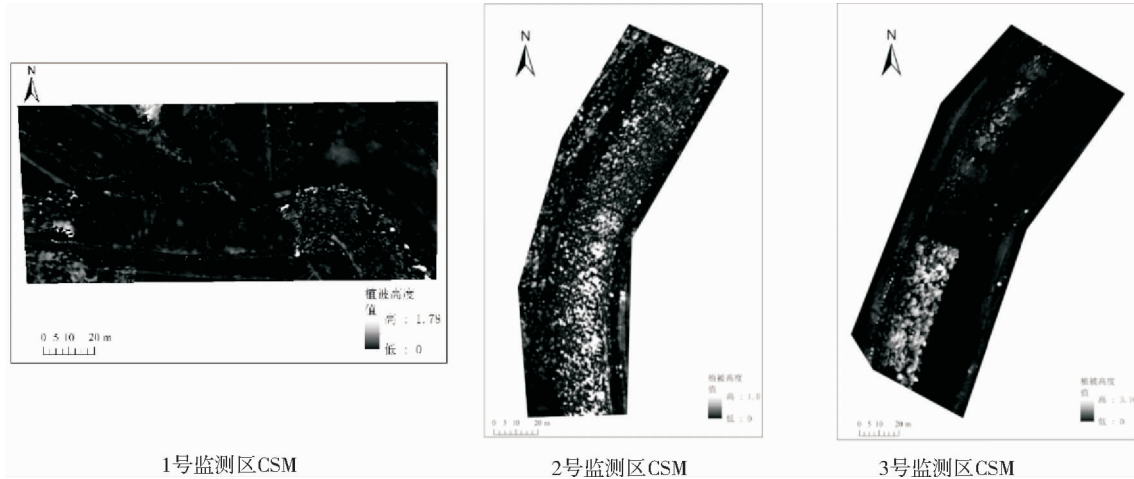


图4 监测区植被高度数据模型

2.3 植物种类提取

将多光谱影像与之前获得的各植被参数结合,根据不同地类的特征使用面向对象的多尺度分割方法进行分级分割(见表2),本文选用 eCognition 软件进行影像分割.

表2 分类数据波段组成及相应作用

类别	构成数据	作用
第1层	多光谱影像	主要的分割依据
第2层	植被指数 NDVI, RVI	分类规则
第3层	植被高度数据(CMS)	分类规则
第4层	叶面积指数(LAI)	分类规则
第5层	植被覆盖度(VFC)	分类规则

多尺度分割进行了3级划分,第1级将道路、裸地、植被进行分类;第2级从植被中依据植被高度进行划分,分为高灌、高草和矮灌、矮草4种;第3级再从中提取植物类型.依据监测区植物的分布特征和种类,结合现场调查,共提取植物种类10~15种(见图5).

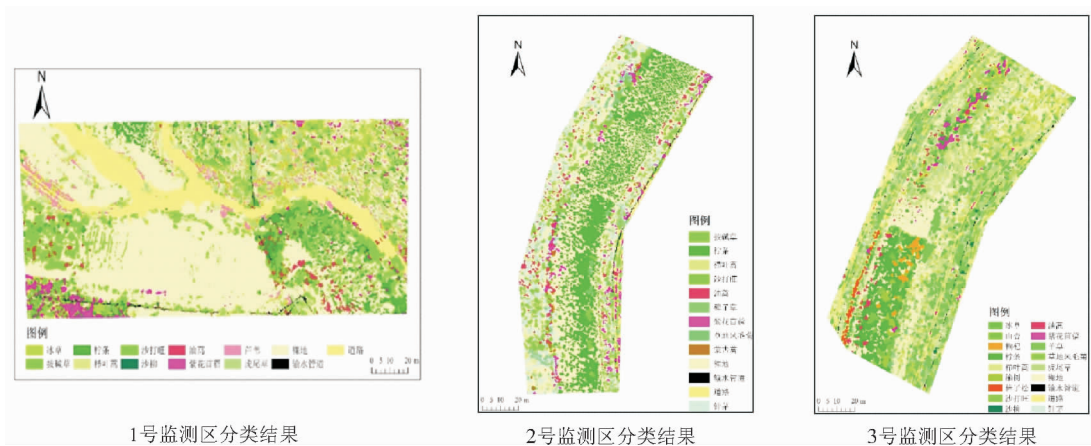


图5 排土场植物种类分布

3 边坡土壤侵蚀定量提取研究

3.1 边坡土壤侵蚀情况实地测量

要实现土壤侵蚀沟的自动提取,必然要验证其提取的精度,需对有代表性的土壤侵蚀情况进行实地测量(见图6),监测区的侵蚀沟是不规则的,因此,通过简略测量方法估算,本次侵蚀沟的现场测量方法为利用卷尺和标杆,在侵蚀沟的平均侵蚀水平处,通过侵蚀沟两边缘宽度找到中点位置,用标杆垂直侵蚀沟方向并过此中点,测量值代表两边缘的平均高度,卷尺测量沟底到标杆的该中点高度即作为此位置的侵蚀深度.现场实测有2个目的,一是作为植被稀疏区域的侵蚀沟自动提取的实测验证样本,通过对比验证侵蚀沟自动提取的精度;二是在植被生长良好的监测区内,侵蚀程度较低,侵蚀沟数目少,植被遮挡的原因使得无人机低空监测难度大,监测准确度降低,因此采用现场测量.

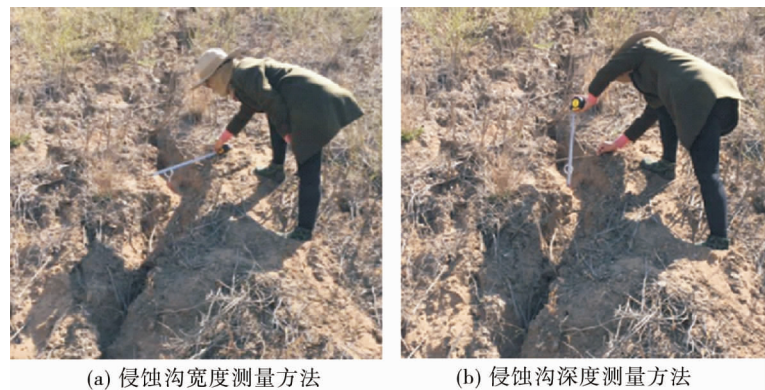


图6 侵蚀沟发育监测与提取

3.2 基于平面曲率自动提取侵蚀沟

范红艳^[14]等对平面曲率的定义进行了概述,沿着垂直于最大坡度方向上的地表曲率,代表地表面任一点在水平方向的弯曲情况变化即为平面曲率.进行现场实测发现,现场实际侵蚀沟的方向与平面曲率的走向相一致,平面曲率对侵蚀沟影响显著,会影响流动的方向,从而进一步影响侵蚀沟的发育,所以,认为平面曲率可以作为提取坡面沟道侵蚀量的一个因素.

为确定该实验中的平面曲率阈值选择,将监测区的影像正射图与该区DEM叠加,对比现场实测情况通过调参调整阈值,找到与实际测量最相近结果的阈值进行平面曲率划分,使用-26位划分阈值得到最终划分结果(见图7),即该区域平面曲率小于-26的定义为侵蚀沟,大于-26的定义为非侵蚀沟,其中在阈值小于-26的范围内,再划定阈值-100为定义深沟与浅沟的临界点,实验证明这种方法能较好自动识别侵蚀沟^[15].

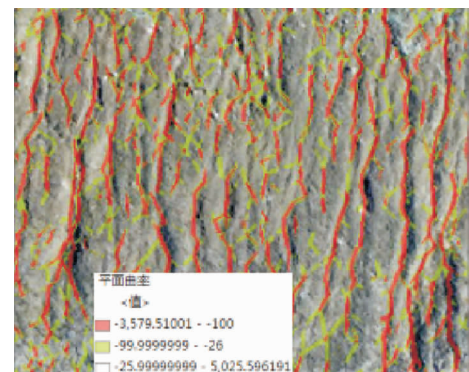


图7 平面曲率阈值选择

3.3 侵蚀沟提取统计结果

利用平面曲率的划分等级和面积焦点统计(见表3),统计运算土壤侵蚀总量(cm^3),计算公式为

$$V = \sum_1^n AH. \quad (4)$$

式中: V 为监测区侵蚀沟的体积; n 为平面曲率划分的等级; A 为不同平面曲率下焦点统计的面积; H 为不同平面曲率统计的平均深度^[16].

表3 侵蚀沟提取统计结果

圆半径/cm	像元面积/ cm^2	侵蚀面积/ cm^2	平均深度/cm	侵蚀体积/ cm^3	总侵蚀体积/ cm^3
10		453 862.24	7.224 9	3 279 109.298	
15	34.574 4	491 809.62	12.601 5	6 197 538.926	56 044 002.96
20		2 062 099.18	22.582 5	46 567 354.730	

在平面曲率分析统计的基础上,焦点统计得到了侵蚀沟侵蚀深度^[17].并采用人工提取的方法目视解译绘制侵蚀沟^[18],目的是验证侵蚀沟自动提取的准确度,因此与自动提取得到的侵蚀沟叠加分析(见图8).使用现场实测的数据来验证自动提取侵蚀沟深度的精度,现场采集的若干组侵蚀沟深度数据做对比,

计算得到平均误差相比其侵蚀沟深度小于5%,误差满足对于土壤侵蚀量自动提取的使用.

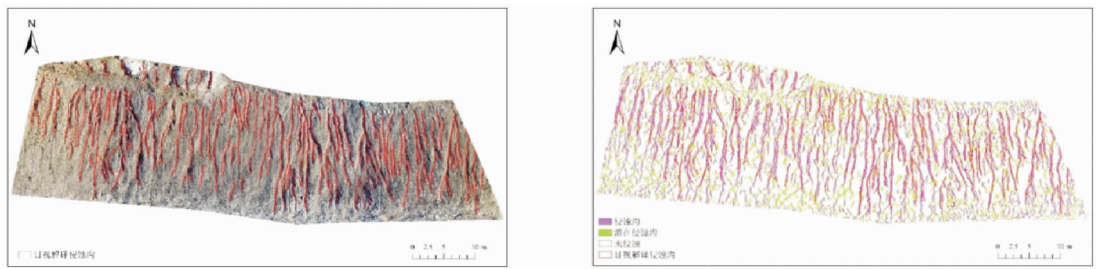


图8 侵蚀沟提取实验证明(左图为目视解译侵蚀沟,右图为目视解译叠加曲率分析自动提取结果)

4 排土场土壤侵蚀与植物配置关系影响分析

4.1 监测区边坡斑块再划分

为便于统计侵蚀沟与植被配置关系,依据植物配置、植被分布及植被覆盖度进行排土场边坡的斑块再划分(见图9),并结合分类结果图将1号监测区划分为4个小区,分别为1-1,1-2,1-3,1-4;将2号监测区划分为2个小区,分别为2-1,2-2;3号监测区划分为7个区域,从南到北依次为3-1,3-2,3-3,3-4,3-5,3-6,3-7.

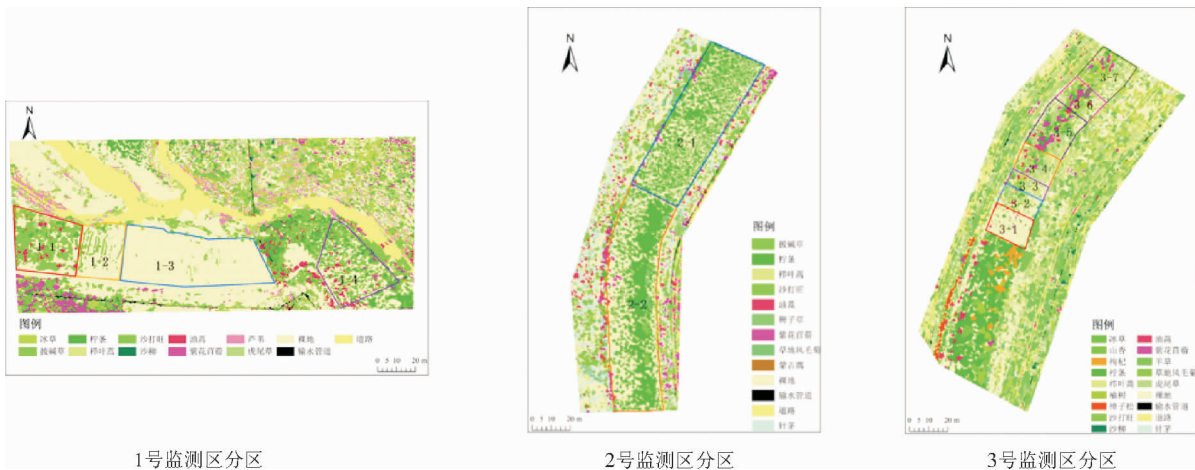


图9 监测区类型斑块再划分

4.2 土壤侵蚀受植被覆盖度影响分析

利用侵蚀沟提取结果得出再划分斑块小区域的土壤侵蚀模数,回归分析植被覆盖度与土壤侵蚀模数,两者指数相关度高,决定系数达到0.8427.二者整体上具有很强负相关指数关系,显示随植被覆盖度的提高,土壤侵蚀模数会越小(见图10).中等植被覆盖度8个区域的植物配置情况和相对应的土壤侵蚀影响具体情况见表4.

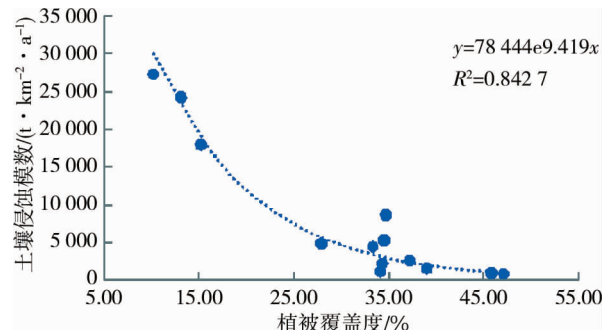


图10 土壤侵蚀模数与植被覆盖度的关系

由表4看出:单一植物配置下的土壤侵蚀最为严重,单一柠条配置比单一披碱草配置的侵蚀控制能力较差;单一草本不如混合草本侵蚀控制能力好;多年生草本和灌木占比越大,侵蚀控制能力越好;从现有监测区看,1号监测区中4号区域的植被配置为最优,披碱草占44%,柠条占41%,沙打旺占8%,油蒿占3%,紫花苜蓿占3%.

表4 植被覆盖度中等区域的植被配置情况

监测区	植被覆盖度/%	植被配置	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	植被成分组成
1-1	33.3	a×7%,b×12%,e×81%	4 438.229	I×19%,II×81%
1-4	34.1	a×41%,b×3%,c×3%,d×8%,e×44%	1 177.039	I×46%,II×54%,
2-1	34.5	a×96%,c×2%,e×2%	5 286.400	I×96%,II×4%
3-3	34.3	a×8%,b×9%,f×10%,h×45%,i×28%	2 242.600	I×17%,II×10%,III×73%
3-4	37.2	a×3%,b×3%,c×5%,d×4%,f×9%,g×8%,h×38%,i×30%	2 638.067	I×6%,II×26%,III×68%
3-7	39.0	a×10%,c×7%,d×11%,g×29%,h×35%,i×8%	1 556.039	I×10%,II×47%,III×43%

注:a为柠条,b为油蒿,c为紫花苜蓿,d为沙打旺,e为披碱草,f为羊草,g为冰草,h为虎尾草,i为栉叶蒿,其中,a,b为多年生灌木归为I大类,c,d,e,f,g为多年生草本归为II大类,h,i为1年生草本归为III大类

5 结论

1) 利用基于无人机遥感影像提取的植被指数结合多光谱影像,得到精度较高的面向对象多尺度分类结果.

2) 利用现场实测和平面曲率对比分析方法确定侵蚀沟划定的平面曲率阈值,并对不同阈值的侵蚀深度进行全面统计,实现侵蚀沟高效率的自动定量提取.

3) 在该区域的植被覆盖度低于25%时,单改变植被配置方式无法明显增强侵蚀控制能力;在植被覆盖度45%以上,且植被配置一定的情况下,单增加植被覆盖度对增强侵蚀控制能力改善较小;30%~40%植被覆盖度可划定为最高效的区间.多年生草本和灌木对土壤侵蚀控制能力较好,但存在上限,就现有的监测区的监测情况,1号监测区中4号区域的植物配置情况为最优植物配置,由此可见具有一定高度的灌木和高草混合在土壤抗侵蚀方面可发挥优势作用.

参考文献:

- [1] 董玉锃.内蒙露天煤矿排土场边坡抗冲性及减水减沙效益研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2015.
- [2] 吕刚,刘红民,高英旭,等.排土场边坡根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J].土壤通报,2014,45(3):711-715.
- [3] 王晓辉,郑优男.基于RS和GIS技术的水土流失动态监测与分析——以淮南矿区为例[J].安徽农业科学,2015(33):373-376.
- [4] 李云鹏.基于GeoWEPP的西部矿区水土流失模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [5] Meng L, Feng Q, Wu K, et al. Quantitative evaluation of soil erosion of land subsided by coal mining using RUSLE[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(1): 7-11.
- [6] 李想,曾以禹,朱思雨,等.北京山区径流侵蚀过程及WEPP模型适用性评价[J].水土保持学报,2018,32(3):98-106.
- [7] 宫传刚,卞正富,卞和方,等.基于无人机与植被指数的排土场DEM模型构建关键技术[J].煤炭学报,2019,44(12):3849-3858.
- [8] Duque J F M, Zapico I, Oyarzun R, et al. A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain[J]. Geomorphology, 2015, 239: 1-16.
- [9] 李恒,雷少刚,黄云鑫,等.基于自然边坡模型的草原煤矿排土场坡形重塑[J].煤炭学报,2019,44(12):3830-3838.
- [10] 魏忠义,白中科.露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J].煤炭学报,2003,28(5):486-490.
- [11] Fang S, Tang W, Peng Y, et al. Remote Estimation of Vegetation Fraction and Flower Fraction in Oilseed Rape with Unmanned Aerial Vehicle Data[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 416.
- [12] 顾祝军.植被覆盖度的照相法测算及其与植被指数关系研究[D].南京:南京师范大学,2005.
- [13] 胡永宁.毛乌素沙地乌审旗境内NDVI与环境因子的尺度响应[D].呼和浩特市:内蒙古农业大学,2012.
- [14] 范红艳,戚鹏程,黄天勇.关于GIS中三种地面曲率的探讨[J].南阳师范学院学报,2011,10(6):66-69.
- [15] 卢洁.基于无人机的排土场边坡植被与土壤侵蚀监测研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [16] 杨超,苏正安,马菁,等.基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法[J].水土保持通报,2016,36(6):126-130.
- [17] Tang G A, Strobl J, Gong J Y, et al. Evaluation on the accuracy of digital elevation models[J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(2): 209-216.
- [18] 周为峰.基于遥感和GIS的区域土壤侵蚀调查研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2005.