

浅沟信息的数码照相识别方法

常 存,朱清科,张学霞,张 艺

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京林业大学,北京 100083)

摘 要:浅沟作为黄土区坡面重要侵蚀形式之一,其侵蚀量占梁峁侵蚀产沙量的 46%。浅沟的发生发展在坡面侵蚀中占据重要地位,如果得不到控制和治理,浅沟发育成切沟后,将吞噬更多可利用土地资源。以黄土丘陵沟壑区野外拍摄的照片资料为研究对象,通过 ERDAS 软件运用 AOI 分析法处理照片资料,提出浅沟信息识别问题的解决方案。据此方法,获得识别浅沟信息的规律,即处于浅沟的 AOI 的 RGB 三基色构成遵循 $DN_R > DN_G$ 的规律,处于峁坡的小斑三基色构成遵循 $DN_R < DN_G$ 的规律。证明了数码照相法应用于浅沟信息识别的可行性,提出计算机自动获取浅沟信息的新理论,在坡面侵蚀治理和遥感软件二次开发上有明显应用价值。

关键词:浅沟;照相法;AOI 分析

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2012)03-0187-06

Methods of Collecting Ephemeral Gully Information by Taking Digital Photos

CHANG Cun, ZHU Qing-ke, ZHANG Xue-xia, ZHANG Yi

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Ephemeral gully is an important form of slope erosion occurring in the Loess region, accounting for 46% of the total amount of soil erosion quantity. The development of ephemeral gully plays an important role in slope erosion. Without effective control and governance, ephemeral gully can develop into cut ditch, which will devour more available land resources. Based on photo shots on Loess Plateau hills region, a solution to recognize ephemeral gully on photos was introduced, in which the photo data were processed by using Area of Interest (AOI) analysis through ERDAS. It was concluded that the ephemeral gully obeyed the law of $DN_R > DN_G$ in RGB color value of AOIs, and that the loess hills obeyed the law of $DN_R < DN_G$. The results demonstrated the practicability of digit photos to be used to extract microtopography data. It provided a new method to investigate ephemeral gully by computer automatically. This theory has obvious practical value in the management of slope erosion and second development of remote sensing software.

Key words: ephemeral gully; digital camera; AOI analysis

浅沟侵蚀是细沟侵蚀向切沟侵蚀演化的一种过渡侵蚀类型,是坡面土壤侵蚀的一种重要侵蚀形式,其发生发展在坡面侵蚀中占有重要地位。浅沟由耕地上主细沟发展形成,其横断面因侵蚀和耕作的不断更替而呈弧形扩展,无明显沟缘。浅沟在黄土高原丘陵沟壑区第一和第二副区广泛分布,沟宽约 1 m,沟深一般约 20~30 cm,也有超过 50 cm 的,浅

沟发育初期和中期阶段,侵蚀量占坡面侵蚀产沙的 58%^[1]。鉴于其重要性,浅沟侵蚀一直受到学者们的高度关注,并在浅沟侵蚀分布特征、浅沟侵蚀发生的地形临界、浅沟侵蚀发育等方面取得了一系列的研究成果^[1-4],为浅沟防治提供重要的科学依据。而目前对于浅沟的研究多通过实地考察和辅助遥感影像来获取浅沟信息^[3-5],数据采集操作复杂且低效。

收稿日期:2011-07-11 修回日期:2011-12-14
基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD38D06)。
作者简介:常存,男,在读硕士,研究方向:生态环境地理学。E-mail: changcun_10@163.com
* 通讯作者:朱清科,男,博士生导师,教授。研究方向:生态环境地理学。E-mail: zhuqingke@sohu.com

若能够通过计算机准确快捷的自动获取浅沟地貌信息,将为坡面侵蚀防治提供极大帮助。

运用遥感技术提取地貌信息也早有研究^[6-9]。研究遥感影像解译和影像信息能更快捷方便的获取大尺度区域地貌信息,建立起目标数据库。但因其复杂性,遥感影像分析在小尺度范围内难以发挥作用。数码成像技术日趋发达,运用照相法替代遥感分析微地形更加经济便捷,大尺度分析以数码照片作为遥感图像的补充,也更能清晰体现局部地貌。数码照相法目前已运用于农作物和林草植被盖度的估算并表现出其准确性和可靠性^[10-14]。部分学者利用数码照片色彩语言(Digital Number)来计算植被盖度。章文波^[15]等、张学霞^[16]等分别研究 HIS 和 RGB 颜色模式并开发计算机自动计算植被覆盖度的软件。运用数码照相法提取地貌信息的研究尚少,章文波^[17]等借助 PCOVER 软件直接提取图像 RGB,HIS 6 个颜色分量,分析不同地物对应颜色分量之间的差异特征。数码照相法快捷高效,准确可靠,拍摄的照片可以通过各种遥感软件处理分析处理。拥有这些优势,在今后的小尺度研究中,数码照相法有极大的潜力代替遥感影响获取地物地貌信息。

本研究通过 ERDAS IMAGINE 8.5 遥感图像处理软件分析实地拍摄的数码照片,从中分析浅沟区别于其他地貌的特征,旨在研究计算机自动获取浅沟信息的方法,为黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀的预防治理及遥感软件二次开发提供理论和技术的支撑。

1 数据采集与处理

1.1 研究区概况

吴起县位于延安市西北部,地处陕、甘两省交界,北洛河上游,地跨 107°38′57″~108°32′49″E、36°33′33″~37°24′27″N,海拔 1 233~1 809 m,属于黄

土高原梁状丘陵沟壑区。沟壑密度为 2.54 km·km⁻²,侵蚀模数为 15 280 t·km⁻²。年平均气温 7.8℃,四季长短不等,干湿分明,年平均降水量 483.4 mm,降水年际之间的变化大。林草覆盖率为 62.9%,森林覆盖率为 38.2%。

1.2 资料调查与处理

选择黄土沟壑丘陵区的陕西省吴起县为调查对象来拍摄微地形照片。拍摄实点遍布于吴起各乡镇,利用索尼 T900 相机对各微地形类型拍照,共拍摄 84 张照片。拍摄时间段为光照柔和、雾气少的 9:30~12:00,14:00~16:30 时间段,拍摄角度与目标坡面呈 0~45°,拍摄方位为对坡拍摄(丘陵沟壑区对坡间距约 300~500 m),调查时间为 2009 年 7 月。本研究主要分析草本覆盖的浅沟,挑选清晰度高的 5 张照片作为研究对象(图 1)。照片编号分别为 1603、1264、1263、1669、2907。

对照片数据的处理主要通过 ERDAS IMAGINE 8.5 遥感图像处理专用软件,实现照片数据格式的转换,空间剖面,数据获取等准备工作。

2 研究方法

根据数字图像色彩构成原理,地物颜色有 R(红)、G(绿)、B(蓝)三基色组成,三颜色的范围都在 0~255 之间。数码照片上不同的地物颜色不同的原因正是构成地物色彩的 R、G、B 三基色 DN(Digital Number)数值不同。因此,对照片进行真彩色合成后,获取照片中各地物各波段 DN 值,探索不同地物 R、G、B 色彩构成的不同规律,以此区分微地形类型。由于影响照片拍摄的因素错综复杂,在研究数码照相法提取浅沟信息时,在一定条件限度内,忽略光照、拍摄距离等次要因素,主要分析照片的 R、G、B 三基色 DN 值与浅沟间的相互关系,充分发挥照相法提取地形的便捷性。

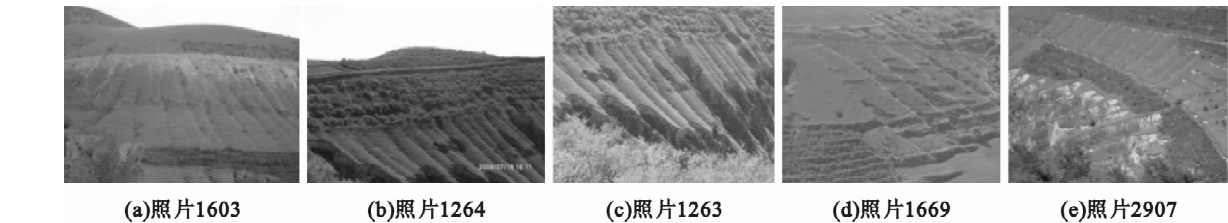


图 1 照片数据概览

Fig. 1 Data of digital photos

2.1 AOI 分析法

通过选取 AOI(Area of Interest)来定义某种地物类型是监督分类的重要步骤之一,同类地物表现出特定的光谱规律,有相似的三基色组成,监督分类选取具有代表性的 AOI 作为分类的识别样本,依此建立

判别函数来对影像分类。理论上,AOI 既然可以作为监督分类判定函数的基础,那么不同地物的 AOI 应具有各自的特征。张学霞^[16]等在研究数码照相法估算植被盖度时采用 AOI 感兴趣区方法选取 AOI 区,统计 R、G、B 三基色 DN 值。本研究着重从 AOI 入手

探索浅沟地貌特有的三基色构成规律。

运用 ERDAS 软件的 AOI 工具分析 5 张照片, 每张照片就浅沟区域区分浅沟沟底、沟缘、坡面 3 种地貌类型, 各选取 20 个小斑, 并提取小斑的 R、G、B 三基色 DN 值来判定三基色数据之间的关系。经 R、G、B 三基色 DN 值大小差值计算发现, 所有坡面 AOI 小斑主要满足 $DN_R < DN_G$ 的规律, 沟底 AOI 小斑主要满足 $DN_R > DN_G$ 的规律, 作为过渡区域的沟缘 AOI 则 2 种现象都存在。分别统计 3 种地貌类型中按照此规律判定成功的小斑数占小斑总数的百分比(表 1)。

表 1 各照片 AOI 判定成功率
Table 1 Success rate of AOI assessment

地貌类型	平均值	照片序号				
		1264	1603	1263	1669	2907
浅沟沟底	82	70	65	80	100	95
沟缘	—	65	60	55	—	15
坡面	73	100	75	80	40	70

注:沟缘数据是判定为坡面 AOI 占总小斑数的百分比。

AOI 选取:一般看来,用 1 200 像素的 SONY-T900 相机拍摄的图像中,浅沟宽度在 20~30 个像元,照片上以横切线为中轴线选取 5×5 的 AOI 作为一个单位,每个小斑包括 25 个像元,到横切线末尾不足 5×5 的像元抛弃(图 2)。

选取照片上跨过数条沟的某条横切线,目视解译确定横切线上浅沟条数及浅沟位置的横坐标;以横切线为中轴线依次向右选取 AOI 并获取小斑的 R、G、B 三基色数据。浅沟最小宽度约为 20 个像元,为消除特殊值的干扰,本文定义只有连续 5 个及

5 张照片中,按照此规律判定浅沟沟底 AOI 的成功率都在 65%以上,最高达 100%;坡面 AOI 的判定仅有照片 1669 的成功率低于 50%,其余 4 张照片成功率在 70%以上。浅沟沟底和坡面判定成功率平均值分别为 82%和 73%。可见,按照坡面小斑 R、G、B 三基色构成遵循 $DN_R < DN_G$;浅沟沟底小斑 R、G、B 三基色构成遵循 $DN_R > DN_G$ 这一规律来识别浅沟信息有着很高的成功率。

2.2 AOI 信息获取

选取照片 1263 作为案例分析材料,根据本文规律识别浅沟信息并计算判定结果的成功率。

以上 AOI 都满足 $DN_R > DN_G$ 这一规律的区域为浅沟。根据此规律判定横切线跨越的沟数,并且确定沟部位置的横坐标。对比目视解译结果与本文规律判定结果,若判定结果的横坐标与目视解译获取的横坐标相似,则判定结果正确。计算判定成功率。

判定成功率: $P=(n-m)/N \times 100\%$ (1)

式中 N :依本文规律判定所得浅沟的条数; n :本文规律判定的浅沟中判定正确的条数; m :未判定出来的浅沟条数。

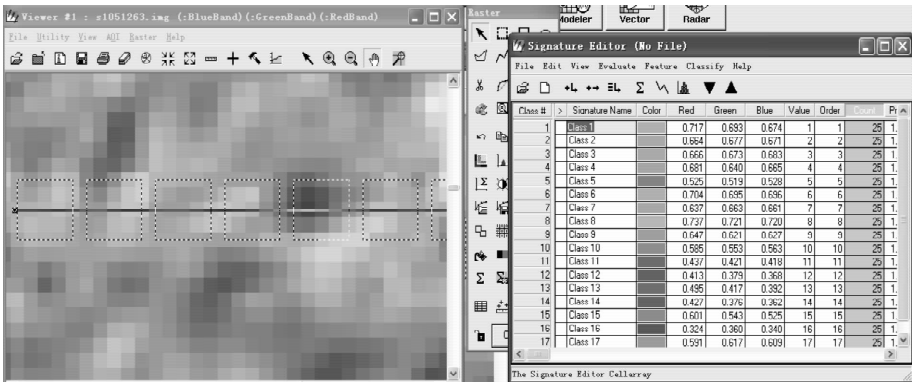


图 2 AOI 小斑选取示意图
Fig.2 Diagram of the selection of AOI

3 结果与分析

3.1 浅沟信息识别

选取跨越 5 条浅沟的横切线,浅沟横坐标分别为:2 510~2 530,2 585~2 612,2 718~2 744,2 912~

2 940 和 3 018~3 058。此条横切线共跨过 640 个像元,按 5×5 获取的 AOI 共 128 个。对获取的 AOI 数据进行处理,计算 $DN_R - DN_G$,依本文规律判定横切线上有 6 条浅沟,对应 AOI 序号依次为:8~15、24~33、52~56、71~77、97~104 和 113~123,对应图上横

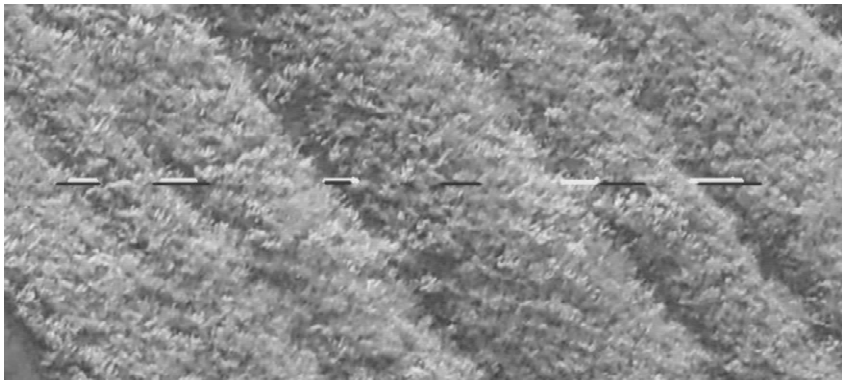
坐标分别为:2 499~2 533、2 578~2 623、2 718~2 738;2 813~2 843、2 943~2 978 和 3 023~3 073(以小斑中心像元坐标代表 AOI 坐标)。

图 3 所示,本文规律对浅沟条数和位置的判定基本符合真实情况。由公式(1)计算判定成功率得 $P=66.7\%$ 。

为验证本文规律是否能保证浅沟识别时能连续表达浅沟的发生发展,选取照片 1263 上一个坡面作

为研究对象,在坡面上等间距选取 10 条横切线,识别浅沟(数量及横坐标)并绘制成图。由图 4 可见,本文规律基本可以准确的确定浅沟的位置,具有良好连续性,能够表现出浅沟的发展方向。

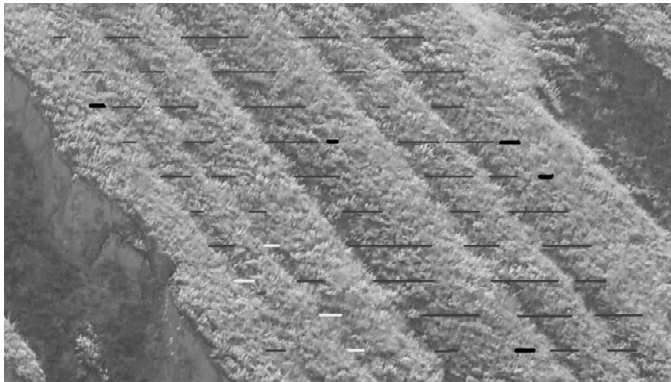
在坡面上选取的 10 条横切线跨越浅沟共 49 条,本文规律判定获取浅沟 50 条,验证成功的浅沟条数为 45 条,未判定出来的浅沟条数为 4 条。由公式(1)计算得判定成功率为 82%。



注:浅色短线代表目视解译结果;深色短线代表本文规律判定结果

图 3 结果对比

Fig. 3 Comparison of the results



注:黑短线代表验证成功的浅沟,加粗黑色短线代表验证失败的浅沟,白色短线代表未判定出来的浅沟。

图 4 浅沟判定结果

Fig. 4 Result of ephemeral gully assessment

由图 4 以及 82%的成功率可看出,本文规律在判定浅沟条数方面有较高的可信度。浅沟信息提取的目的是要为坡面侵蚀防止服务,在掌握浅沟数量的位置的基础上需进一步计算浅沟面积。浅沟数量可以反映坡面的破碎度,位置可以反映浅沟的发生发展,计算浅沟面积用于确定坡面浅沟侵蚀量,是坡面侵蚀研究的重要环节。

3.2 坡面浅沟面积计算

在已知坡面面积的基础上,只需判断浅沟占坡面面积的百分比即可获得浅沟面积。在照片上即要获取浅沟像元占总像元的百分比,归根结底是要统计处于浅沟的像元数。表 2 显示了目视解译和本文规律判定提取的浅沟宽度(以像元个数计算)的对

比。2 种算法的结果对比发现,目视解译得到的浅沟像元数值相对较小,平均值约为本文规律判定沟宽的 2/3。

根据这一结果坡面浅沟面积和实际坡面面积存在如下关系:

$$\frac{S_{\text{浅沟}}}{S_{\text{坡面}}} = \frac{2}{3} \times \frac{I}{I_{\text{总}}}$$

(2)

$S_{\text{浅沟}}$:坡面浅沟面积; $S_{\text{坡面}}$:实际坡面面积; I :浅沟像元数; $I_{\text{总}}$:照片总像元数

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)AOI 分析法综合考虑了像元所处的微环

境,易于表达区域规律,能够较好的反映不同的地貌差别,从数码照相中提取微地貌信息。

表 2 沟宽判定结果

Table 2 Result of the assessment of ephemeral gully width			
编号	解译沟宽	判定沟宽	差值
1	22	20	2
	23	55	-32
	55	105	-50
	24	65	-41
	68	85	-17
2	23	30	-7
	23	40	-17
	50	100	-50
	29	50	-21
	62	100	-38
3	26	45	-19
	20	60	-40
	35	100	-65
	22	20	2
	40	50	-10
4	20	20	0
	19	45	-26
	32	80	-48
	38	65	-27
	25	75	-50
5	30	50	-20
	35	35	0
	50	70	-20
	37	75	-38
	24	45	-21
6	22	20	2
	23	25	-2
	27	65	-38
	30	35	-5
	45	95	-50
7	35	40	-5
	—	—	—
	25	131	-106
	39	55	-16
	29	74	-45
8	40	40	0
	68	95	-27
	15	105	-90
	51	49	2
	—	—	—
9	—	—	—
	113	90	23
	40	85	-45
	30	75	-45
	32	30	2
10	—	—	—
	91	35	56
	28	45	-17
	22	45	-23
平均值	36.38	60.42	-24.04

注:表中以像元个数代表沟宽。

(2)数码照相法揭示草本覆盖的浅沟存在如下规律:浅沟沟底的 AOI 的 R、G、B 三基色构成遵循 $DN_R>DN_G$ 的规律, 崤坡的 AOI 三基色构成遵循 $DN_R<DN_G$ 的规律, 且判定浅沟位置的准确率达到 82%;坡面浅沟面积和实际坡面面积满足方程: $S_{\text{浅沟}}/S_{\text{坡面}}=2/3 \times I/I_{\text{总}}$ 。本结论提出计算机获取

浅沟信息的新理论,对于坡面侵蚀的防止有重要意义,同时也可配套软件的编写和开发提供了理论支持。

4.2 讨论

AOI 分析法的优势在于 AOI 表达以单个像元为中心的小斑的综合信息,考虑单个像元的环境因素,更能代表某种特殊地物。依作者观点判断某一像元处于浅沟沟底还是坡面不应仅考虑它的自身属性,而应该顾及像元所处的微环境,若周边一定区域内,处于浅沟沟底的像元多,则应把像元归为浅沟沟底;反之,则归类为坡面。综合考虑像元微环境更有利于排除由于植被叶片、花朵、光线造成的单个像元特殊值的干扰。本文中每一个小斑所处的位置不是由 5×5 区域中心像元的位置决定,而是由 25 个像元的总体情况确定。

本研究结果表明数码照相法不仅可用于植被覆盖度的估算,也可以用于黄土区草本覆盖浅沟地形信息的识别,并且,结合 AOI 分析法能达到理想的效果。结果为遥感软件二次开发提供理论和技术的支持,为浅沟信息调查提供新的方法。它对于陕北黄土丘陵沟壑区等重侵蚀区的坡面浅沟研究和坡面侵蚀预防治理有着重要意义。

研究的草本覆盖浅沟信息识别规律是在黄土高原典型退耕还林区研究获得,且采用夏季照片资料分析,是否在其他区域、其他季节、其他植被状态适用,还需要更多数据的验证和完善,需要从多学科、综合技术的支持下进一步研究,获取更为完善的结果以便为坡面侵蚀防止提供更大帮助。

参考文献:

[1] 郑粉莉,武敏,张玉斌,等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 438-442.
ZHENG F L, WU M, ZHANG Y B, *et al.* Ephemeral gully development process at Loess steep hillslope[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 438-442. (in Chinese)
[2] 张永光,伍永秋,汪言在,等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 145-154.
ZHANG Y G, WU Y Q, WANG Y Z, *et al.* Seasonal discrepancy of ephemeral gully erosion in Northeast China with black soils[J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 145-154. (in Chinese)
[3] 张科利,唐克丽,王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13.
ZHANG K L, TANG K L, WANG B K. A study on characteristic value of shallow gully erosion genesis on slope farmland in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(2): 8-13. (in Chinese)
[4] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨. 地理科学, 2006, 24(4): 449-454.

HU G, WU Y Q, LIU B Y, *et al.* Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 24(4): 449-454. (in Chinese)

[5] 李安怡, 吴秀芹, 朱清科. 陕北黄土区浅沟分布特征及其与立地类型的关系[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(4): 79-85.

LI A Y, WU X Q, ZHU Q K. Distribution characteristics and relation with site type of ephemeral gully in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(4): 79-85. (in Chinese)

[6] 刘秉正, 吴发启. 黄土塬区沟谷侵蚀与发展[J]. *西北林学院学报*, 1993, 8(2): 7-15.

LIU B Z, WU F Q. Gully erosion and its development on Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1993, 8(2): 7-15. (in Chinese)

[7] 刘兴文, 姜小光. 不同时相遥感图像光机复合处理提取土地荒漠化信息研究[J]. *干旱区地理*, 1996, 19(3): 1-6.

LIU X W, JIANG X G. Extraction of the change information of land desertification from multitemporal remote sensing images by the method of combining optical false colour composite with computer digital image processing[J]. *Arid Land Geography*, 1996, 19(3): 1-6. (in Chinese)

[8] 李金朝, 国庆喜, 葛剑平. 基于 DEM 的黄土高原沟壑区沟道系统的自动提取[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(6): 220-223.

LI J C, GUO Q X, GE J P. DEM based automated extraction system of gully in the Loess Upland Gully Area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(6): 220-223. (in Chinese)

[9] 刘海江, 柴慧霞, 程维明, 等. 基于遥感的中国北方风沙地貌类型分析[J]. *地理研究*, 2008, 27(1): 109-118.

LIU H J, CHAI H X, CHENG W M, *et al.* A research of aeolian landform in northern China based on remote sensing imagery[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 109-118. (in Chinese)

[10] ZHOU Q. Ground truthing, how reliable is it[C]. *Proceedings of Geoinformatics'96 Conference*, West Palm Beach, FL, 1996(Berkeley: CGPIS): 69-77.

[11] ZHOU Q, ROBSON M. Automated rangeland vegetation cover and density estimation using ground digital images and a spectral-contextual classifier[J]. *Remote Sensing*, 2001, 22(17): 3457-3470.

[12] ANATOLY A GITELSON, YORAM J K, ROBERT S, *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.

[13] FRIEDL M A, MIELHAELSEN J, DAVIS F W, *et al.* Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1401-1420.

[14] SATTERWHITE M B, HENLEY J P. Spectral characteristics of selected soils and vegetation in northern Nevada and their discrimination using band ratio techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 23(2): 155-175.

[15] 章文波, 刘宝元, 吴敬东. 小区植被覆盖度动态快速测量方法研究[J]. *水土保持通报*, 2001, 21(6): 60-63.

ZHANG W B, LIU B Y, WU J D. Monitoring of plant coverage of plots by visual estimation and overhead photograph [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(6): 60-63. (in Chinese)

[16] 张学霞, 朱清科, 吴根梅, 等. 数码照相法估算植被盖度[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 164-169.

ZHANG X X, ZHU Q K, WU G M, *et al.* Vegetation coverage assessment by digital photos[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(1): 164-169. (in Chinese)

[17] 章文波, 路炳军, 石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(2): 39-42.

ZHANG W B, LU B J, SHI W. Determination of vegetation coverage by photograph and automatic calculation[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(2): 39-42. (in Chinese)

(上接第 166 页)

[12] 宗良刚, 刘存丽, 董雅文. 南京市景观空间格局演变及驱动力分析[J]. *南京农业大学学报*, 2006, 29(3): 49-53.

ZONG L G, LIU C L, DONG Y W. Analysis of landscape spatial evolution and its driving forces in Nanjing[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3): 49-53. (in Chinese)

[13] 陈利项, 傅博杰. 景观连接度的生态学意义及其应用[J]. *生态学杂志*, 1999, 15(4): 37-42.

CHEN L D, FU B J. Ecological significance of landscape connectivity and its applications [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 15(4): 37-42. (in Chinese)

[14] 裴浩, 李云鹏, 乌日娜, 等. 应用卫星遥感技术监测生态建设工程[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(4): 221-226.

PEI H, LI Y P, WU R N, *et al.* Applying RS techniques in ecological engineering monitoring [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(4): 221-226. (in Chinese)

[15] 李爱敏, 韩致文, 黄翠华. 21 世纪科尔沁沙地沙漠化程度变化动态监测[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 546-551.

LI A M, HAN Z W, HUANG C H. Transformation dynamics of desertification in Horqin Sandy Land at the beginning of the 21st century[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 546-551. (in Chinese)

[16] 王晓青, 杨联安, 姜英, 等. 毛乌素沙地南缘湿地/沙化土地动态变化分析[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(4): 73-77.

WANG X Q, YANG L N, JIANG Y, *et al.* Dynamic change of wetland and sandification in the south of Mu Us sandy land [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(4): 73-77. (in Chinese)