

基于 Landsat 8 OLI 影像的延河流域土壤线 提取及其应用研究

王 玲, 刘咏梅, 常 伟, 李晓焕, 凯 楠, 赵牡丹

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要: [目的] 以延河流域为研究区, 利用自动提取算法建立典型黄土的土壤线方程, 为土壤调节植被指数的计算提供基本参数。[方法] 基于 Landsat 8 OLI 遥感影像, 采用自动提取算法获取土壤线参数; 分析归一化植被指数 NDVI, 土壤调节植被指数 PVI, TSAVI, ATSAVI 与实测盖度的相关性, 探讨所构建的土壤线方程在黄土高原地区植被指数提取中的适用性。[结果] 通过自动算法与常规方法对比发现两者偏差较小, 且自动提取算法具有较高的精度和稳定性; 各植被指数与实测盖度的相关性大小为: $PVI > NDVI > TSAVI > ATSAVI$, PVI 为延河流域植被盖度反演的最优植被指数, NDVI 次之, TSAVI 与 ATSAVI 较差; 与 NDVI 指数相比, PVI 指数能够较好地抵抗土壤噪声的影响, 对不同植被类型的敏感性较高, 更适用于植被覆盖度较低的黄土高原。[结论] 自动提取算法对延河流域土壤线的提取较为适用, 所得参数适合于计算土壤调节植被指数。

关键词: 土壤; 植被; 土壤线; 植被指数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)01-0161-05

中图分类号: TP79, P641.6

文献参数: 王玲, 刘咏梅, 常伟, 等. 基于 Landsat 8 OLI 影像的延河流域土壤线提取及其应用研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 161-165. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 029; Wang Ling, Liu Yongmei, Chang Wei, et al. Extraction and application of soil line in Yanhe River basin based on Landsat 8 OLI[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 161-165. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 029

Extraction and Application of Soil Line in Yanhe River Basin Based on Landsat 8 OLI

WANG Ling, LIU Yongmei, CHANG Wei, LI Xiaohuan, KAI Nan, ZHAO Mudan

(Department of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] Taking Yanhe River basin as a study area, typical loess soil line equation was established by automatic algorithm to provide basic parameters for the calculation of the soil adjusted vegetation index. [Methods] Based on Landsat 8 OLI images, soil line was extracted by automatic algorithm, then the correlation coefficients between normalized difference vegetation index (NDVI), perpendicular vegetation index (PVI), transformed soil-adjusted vegetation index (TSAVI), adjusted transformed soil-adjusted vegetation index (ATSAVI) and test coverage were calculated; and the applicability of soil line equation in vegetation index extraction was also discussed in the Loess Plateau. [Results] (1) Compared with conventional method, the difference was small, and the automatic algorithm had high accuracy and stability; (2) The sequence of the correlation between vegetation index and test coverage was: $PVI > NDVI > TSAVI > ATSAVI$, which showed that PVI was the optimal vegetation index, NDVI was the next, TSAVI and ATSAVI were the worst to the extraction of vegetation coverage in Yanhe river basin; (3) Compared with NDVI, PVI index could reduce the influence of soil noise, and its sensitivity to different vegetation types was

收稿日期: 2016-06-21

修回日期: 2016-07-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向土壤侵蚀评价的结构植被盖度遥感模型研究”(41171225), “梯田对坡度坡长因子的扰动特征研究”(41271284)

第一作者: 王玲(1989—), 女(汉族), 陕西省商洛市人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术与应用方面的研究。E-mail: qqzjwl123@163.com。

通讯作者: 刘咏梅(1970—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 主要从事区域水土流失遥感测方面的研究。E-mail: liuym@nwwu.edu.cn。

higher. PVI was more suitable for the Loess Plateau with low vegetation coverage. [Conclusion] It is suitable to extract the soil line by automatic extraction algorithm in Yanhe river basin, and the parameters can be used to calculate the soil-adjusted vegetation index.

Keywords: soil; vegetation; soil line; vegetation index

土壤线是指土壤的反射率或亮度值在可见光红、近红外波段之间的线性关系^[1-3]。土壤的光谱特征受土壤有机质、氧化铁、粗糙度等众多因素的影响,但是对于同一种土壤来说,其反射光谱在红与近红外波段形成了特定的土壤线^[4-6]。土壤线不仅反映土壤的光学特性,有助于了解土壤和植被的理化性质与生态特征,并且参与植被指数计算,消除观测场土壤背景的影响,如垂直植被指数(perpendicular vegetation index, PVI)^[3]、土壤调整植被指数(soil-adjusted vegetation index, SAVI)^[7]和转换型土壤调整植被指数(transformed soil-adjusted vegetation index, TSAVI)^[8]等均基于土壤线方程的参数进行计算。另外,土壤线还可用于表征土壤的不同湿度状况,詹志明等^[9]基于土壤线斜率提出的土壤干旱指数(perpendicular drought index, PDI),可以有效监测土壤水分。

常规提取土壤线的方法,是利用地面实测土壤光谱、影像解译及其他方法从遥感影像上识别出裸土像元,进行土壤线参数的计算。刘焕军等^[5]利用室内测定的土壤光谱反射率计算得到土壤线,并在研究东北黑土带土壤线变异规律时,使用比值植被指数确定裸土像元的方法提取黑土带不同分区的土壤线参数^[10];武婕等^[4]采用遥感图像解译裁剪出裸土像元的方法提取山东典型土壤的土壤线。常规方法较为复杂,受人为因素影响较多,并且对于中低分辨率的遥感影像来说,裸土的识别难度较大而难以实行。因此,越来越多的学者将研究重点转向土壤线的自动提取,土壤线自动提取是通过一系列算法提取图像上的裸露像元,如 Fox 等^[11]和秦其明等^[12]提出的土壤线自动提取算法;徐丹丹等^[13]在提取加拿大混合草地的土壤线时采用的(R, NIR_{min})法和分数位回归法;杨国范等^[14]在秦其明的算法基础上进行改进提出的修正土壤线自动提取算法等。自动算法在保证模型精度的情况下,使得土壤线的提取易于实现。

延河流域作为黄土丘陵沟壑区的第二副区,其土壤类型在该地区具有代表性。准确提取典型黄土的土壤线,将为各种土壤调节植被指数提供基本参数,对于黄土高原地区的水土流失监测和植被生态建设有重要意义。由于土壤类型复杂多样,目前对于土壤线的研究仍具有一定的地域限制,国内对于土壤线的研究集中于东北黑土区^[5,10]、山东省^[4]、宁夏^[12]与辽

宁^[14]等省份,而对陕北黄土高原典型黄土的土壤线研究甚少。其次,目前自动提取算法的应用未得到广泛推广,准确提取土壤线参数仍具有一定难度。本文拟以延河流域为研究区,基于 Landsat 8 OLI 遥感影像,采用自动提取算法获取典型黄土土壤线参数;通过归一化植被指数 NDVI,土壤调节植被指数 PVI, TSAVI, ATSAVI 与实测盖度的相关性分析,探讨所构建的土壤线方程在黄土高原地区植被指数提取中的适用性,以期为区域植被覆盖度的遥感估算提供基本参数。

1 研究区与数据预处理

1.1 研究区概况

延河是黄河的一级支流,发源地为靖边县天赐湾乡周山,主要支流有杏子河、西川、蟠龙川和南川等,由西北向东南注入黄河。延河流域位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,东经 108°45′—110°28′,北纬 36°23′—37°17′,海拔 495~1 795 m,流域面积 7 725 km²,年平均气温 9℃,年平均降水量 520 mm,属典型的温暖半干旱大陆性气候。流域内黄土丘陵沟壑区占总面积的 90%,主要土壤类型为粉沙质黄绵土,占土地面积的 85%以上。由于自然条件和人为活动的原因,该地区土壤侵蚀十分严重。植被分布具有明显的地带性规律,从南向北依次为森林区、森林草原区和草原区^[15]。

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 遥感数据 黄土高原在冬季植被覆盖度低,裸露地面较多,故研究中选取覆盖延河流域的 2015 年 1 月 22 日 127/34, 127/35 与 2014 年 12 月 30 日 126/35 轨道上的 3 景 Landsat OLI 遥感影像(含云量分别为 0.11, 0.07 与 6.28)提取土壤线。选取 2014 年 8 月 15 日 127/34, 127/35 与 2014 年 8 月 24 日 126/35 轨道上的 3 景 Landsat OLI 遥感影像(含云量分别为 0.08, 0.54 与 2.77)用于计算研究区各种植被指数,所使用的投影类型为 UTM, 椭球体为 WGS84。

遥感影像的预处理主要包括以下几个部分:① 对冬、夏两期遥感影像分别进行辐射定标,将 DN 值转换为辐亮度值;② 对定标后的影像进行 Flaash 大气校正,得到地表真实反射率值;③ 进行遥感影像拼接并利用延河流域边界矢量文件裁剪出研究区;

④ 对野外实测点与遥感影像进行配准,以确保实测样点位置的准确性。

1.2.2 实测数据 为了研究各种土壤调节植被指数反演植被盖度的适用性,2012—2014 年 8 月在研究区进行了群落盖度实地调查,选取典型植被群落样方 54 个,主要包括刺槐林、杨树林、沙棘灌丛、柠条灌丛、退耕草地等。调查内容包括主要植被类型、群落总盖度,样地经纬度坐标、坡度、坡向、海拔高度等。为保证群落总盖度测量的准确性,由多名野外调查人员目测估算盖度,取平均值作为样地群落的总盖度。

2 研究方法

2.1 土壤线提取方法

根据前人研究成果,本文使用归一化水体指数与阈值相结合的方法去除水体像元,再结合基于二维光谱特征空间的 (R, NIR_{min}) 法提取土壤线,其中 R, NIR_{min} 分别指红光波段反射率值、近红外波段反射率的最小值。 (R, NIR_{min}) 法的核心思想是:在 NIR-RED 空间中,由于水体与植被像元明显地分列于土壤线两侧^[16-17],且裸土像元与植被覆盖像元整体呈典型三角形分布^[12],剔除水体像元的影响后,土壤像元多分布于散点图的下方,即横坐标所对应纵坐标的最小值,据此找出土壤像元,计算土壤线参数。本文提取土壤线过程分为以下 2 个部分:

(1) 水体像元的剔除。 (R, NIR_{min}) 自动提取算法的精度受水体影响较大,选择合适的水体提取方法尤为重要。常用的水体提取方法有:单波段阈值法、多波段谱间关系法和水体指数法等^[18-20]。程磊等^[19]指出各种水体识别方法均不能提取满意的水体信息,反映了黄土高原地区水体识别的复杂性和下垫面的特殊性,给水体识别带来了很大的不确定性,相比这 3 种方法,归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[21]和阈值法的综合应用能够有效去除山体阴影的影响,提取的水体信息更为真实准确。故本文选取 NDWI 指数与阈值相结合的方法提取水体并进行掩膜处理,NDWI 的表达式如下:

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{NIR}) / (\rho_{Green} + \rho_{NIR}) \quad (1)$$

式中: ρ_{Green} 和 ρ_{NIR} ——影像绿波段与近红外波段的反射率值。通过对水体像元的 NDWI 值进行统计,最终确定的 NDWI 阈值范围大于 -0.13。

(2) 土壤线参数的获取。本文提取土壤线参数的获取流程如图 1 所示。

该过程主要在 Envi 5.2 环境中实现,首先,以剔除水体后的延河流域 OLI 影像波段 4 为横轴,波段 5 为纵轴绘制二维散点图;其次,使用 ROI 工具将散点

图中分布于较下方的散点筛选出来,并将其以感兴趣区的形式输出在影像上;然后,将 ROI 导出为 CSV 格式文件并用 Excel 等工具打开,该文件中含有每个 ROI 像元在遥感影像上对应的所有波段信息。由于遥感影像的像元数过多,寻找所有土壤点的效率较低,为了保证土壤点集的准确度,将 NIR-RED 空间的横坐标按照反射率为 0.002 5 的间隔分为 200 组,分别求取每个间隔的反射率值所对应的波段 5 的最小值,得到初始土壤点集;接下来,为了数据的代表性与方程的稳定性,分别计算以横坐标总区间范围的 0%~50%,0%~100%,25%~100%,50%~100%,0%~75%与 25%~75%为区间子集的土壤点集的相关系数^[12],对初始土壤点集进行筛选,取相关系数最大的为最佳横坐标区间,得到最终的土壤点集;最后,采用最小二乘法拟合方程,得到土壤线参数。

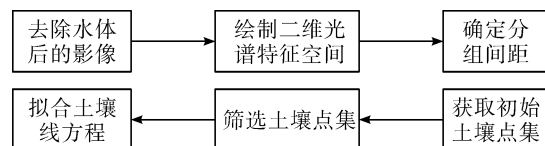


图 1 土壤线提取流程

2.2 土壤调节植被指数

为了验证所提取的土壤线参数应用于土壤调节植被指数计算的有效性,选用了以下植被指数:PVI, TSAVI 与 ATSAVI(改进转换型土壤调整植被指数,adjusted transformed soil-adjusted vegetation index)^[8],分析 PVI, TSAVI, ATSAVI 以及应用最为广泛的植被指数 NDVI 与实测盖度之间的相关性,并通过与 NDVI 的对比探讨研究区最适宜的植被指数。其中,各植被指数的计算公式如下所示^[13,22]。

$$PVI = \frac{NIR - aR - b}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (2)$$

$$TSAVI = \frac{a(NIR - aR - b)}{aNIR + R - ab} \quad (3)$$

$$ATSAVI = \frac{a(NIR - aR - b)}{aNIR + R - ab + X(1 + a^2)} \quad (4)$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

式中: R, NIR ——影像红光波段、近红外波段的反射率; a, b ——土壤线的斜率、截距;ATSAVI 计算公式中 $X=0.08$ 。

3 结果与分析

3.1 土壤线提取结果

采用自动算法获取土壤线,并将其加载在延河流

域 OLI 影像所构成的 NIR-RED 光谱特征空间中,结果如图 2 所示,该结果表明 Landsat 8 OLI 的第 4,5 波段反射率之间具有较好的线性关系,提取出的土壤线在 NIR-RED 光谱空间中的实际位置与理论上的相符。

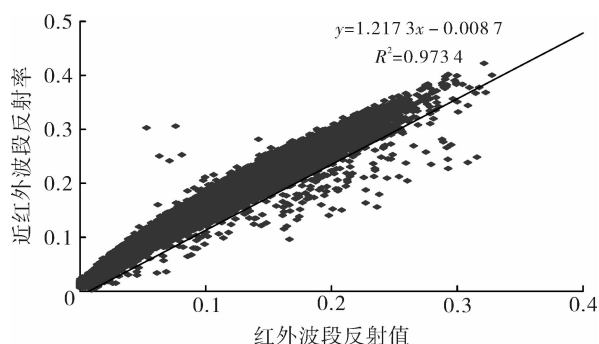


图 2 自动算法提取土壤线拟合结果

目前,有学者在计算延河流域土壤调节植被指数时,采用纯净像元指数法确定土壤线参数^[16]。为了检验自动提取算法的可靠性,本文在使用自动提取算法的同时,在 Envi 5.2 中对影像进行 MNF 变换,计算纯净像元指数,在 N 维可视化窗口中选取纯净裸土像元,并在 NIR-RED 空间中进行回归分析拟合出土壤线,结果如图 3 所示。将自动提取算法与常规方法得到的土壤线参数进行对比,两者斜率相差 0.067,截距相差 0.061,由此可看出,2 种方法提取的土壤线参数相差较小,且前者方程的拟合度较高,说明自动提取算法对延河流域土壤线的提取较为适用。

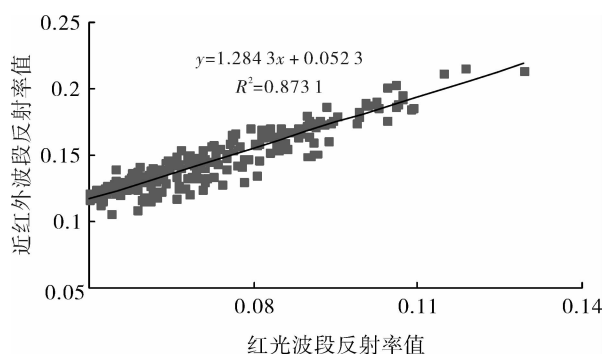


图 3 常规方法获取土壤线结果

3.2 土壤线参数应用

3.2.1 植被指数与实测盖度的相关性分析 利用自动提取和常规方法得到的土壤线参数计算垂直植被指数 PVI,转换型土壤调整植被指数 TSAVI,改进转换型土壤调整植被指数 ATSAVI,归一化差值植被指数 NDVI,提取实测样方盖度对应的各植被指数值,计算各植被指数与实测盖度之间的相关性,得到的结果如表 1 所示。

从 2 种不同方法所计算的相关性结果可以看出,采用自动算法计算的植被指数与实测盖度的相关性在一定程度上有所提高,说明自动提取算法能够提高基于土壤线参数的植被指数对植被覆盖度的敏感性。这主要是因为自动算法能够为植被指数提供更加准确和稳定的土壤线参数,消除不确定因素的影响。

表 1 植被指数与实测盖度的相关性

方法	PVI	TSAVI	ATSAVI	NDVI
常规方法	0.683	0.621	0.555	0.633
自动算法	0.707	0.631	0.584	—

注:置信度为 95%;数据检验的有效性 sig. < 0.05;上述回归分析均显著相关。

从各植被指数与实测盖度的相关性结果可以看出,NDVI,PVI,TSAVI,ATSAVI 与实测盖度之间存在显著相关性,均可以用于反演植被覆盖度。各植被指数与实测盖度的相关性大小依次为: PVI > NDVI > TSAVI > ATSAVI,说明 PVI 为该区域最优植被指数,其次是 NDVI,TSAVI 与 ATSAVI 最差。黄土高原地区植被覆盖度较低,NDVI 等指数受土壤背景的影响比较强烈,而 PVI 充分考虑研究区土壤背景的影响,引入土壤线参数提高了植被指数表征植被覆盖度的精度。

3.2.2 PVI 与 NDVI 指数的对比分析

(1) 不同植被指数抗土壤噪声的能力对比。植被信号—土壤噪声比(S/N)^[23]用以表征不同植被指数对土壤噪声的敏感程度, S/N 值越大,代表植被指数削弱土壤背景影响的效果越好,植被信号越突出。 S/N 的计算公式为:

$$S/N = \overline{VI}/2\delta \quad (6)$$

式中: \overline{VI} ——各样区植被指数的平均值; δ ——不同植被覆盖下植被指数的标准差。

为了研究 PVI 与 NDVI 在不同盖度下抵抗土壤噪声的能力,分别以 PVI 和 NDVI 为基础,采用像元二分模型估算研究区植被覆盖度(见公式 7),其中 PVI,NDVI 的置信区间取 5%~95%;然后,按盖度从低到高依次选取若干个以 30×30 像元大小窗口作为基本研究样区,且要求每个样区内的盖度均匀;计算每个样区内 PVI 与 NDVI 指数的 S/N 值。结果如表 2 所示。

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad \text{或} \quad F_c = \frac{PVI - PVI_{\min}}{PVI_{\max} - PVI_{\min}} \quad (7)$$

式中: F_c ——植被覆盖度; $NDVI_{\max}$, $NDVI_{\min}$ ——NDVI 指数的最大值、最小值; PVI_{\max} , PVI_{\min} ——PVI 指数的最大值、最小值。

表 2 不同盖度下植被指数的 S/N 值

指 标	1 样区	2 样区	3 样区	4 样区	5 样区	6 样区	7 样区	8 样区
PVI 的 S/N 值	4.741	2.424	2.630	2.291	3.329	3.195	3.355	3.259
NDVI 的 S/N 值	3.104	2.346	2.189	2.566	3.792	5.369	4.744	10.579
盖度/%	25.570	36.620	40.480	45.730	52.110	58.530	69.050	86.420

表 2 显示,在盖度大约为 45%时,PVI 与 NDVI 的 S/N 值大小关系开始发生变化。当盖度小于 45%时,PVI 的 S/N 值大于 NDVI 的 S/N 值;当盖度大于 45%时,情况刚好相反。这一结果说明在盖度小于 45%时,PVI 指数抗土壤噪声的能力较 NDVI 的强,更能突出植被信号;而在盖度大于 45%时,NDVI 指数所表征的植被信号比 PVI 指数强。上述结果说明,PVI 指数对低植被覆盖区植被信息的提取效果较好,NDVI 指数则更好反映了高植被覆盖区的植被信息,这一结论与池宏康^[24]关于黄土高原地区植被信息提取方法的研究结果相一致。

(2) 变异系数对比。标准差与平均数的比值称为变异系数,变异系数反映了数据的相对分散程度。变异系数越大,数据离散程度越大,对不同植被类型特征的敏感性越高。延河流域 PVI,NDVI 指数的统计特征值与变异系数如表 3 所示。

表 3 各植被指数的特征值统计

植被指数	最小值	最大值	值域区间	平均值	标准差	变异系数
PVI 值	-0.130	0.330	0.460	0.132	0.039	0.295
NDVI 值	-1.000	1.000	2.000	0.640	0.153	0.239

表 3 显示,PVI 指数的变异系数比 NDVI 大,表明 PVI 对于不同植被类型的敏感度相对较高。结合黄土高原植被覆盖低、大部分地区受土壤背景影响较大的特点来说,PVI 比 NDVI 更适用于该区域的植被覆盖度反演。

4 讨论与结论

已发表的土壤线参数变化范围:斜率为 1.06~1.6,截距为 -0.01~0.07(与斜率的变化趋势相反)^[6],本文得到的土壤线参数均在以上范围内,且与常规方法相比,自动提取算法能够在一定程度上提高植被指数对植被盖度的敏感性,说明了利用自动提取算法提取延河流域土壤线方程的适用性。

将提取的土壤线参数应用于土壤调节植被指数的计算,各种植被指数与实测盖度的相关性大小依次为:PVI>NDVI>TSAVI>ATSAVI,PVI 为延河流域反演植被盖度的最优植被指数,NDVI 次之,

TSAVI与 ATSAVI 较差。通过对 NDVI 与 PVI 指数的对比分析可知,PVI 指数能够更好地抵抗土壤噪声的影响,对不同植被类型的敏感性更高,对低植被覆盖区植被信息的提取效果较好。采用自动方法提取的典型黄土土壤线参数适用土壤调节植被指数的计算,因而具有实际的应用意义。

土壤线提取的关键是裸土像元的识别,在使用自动提取算法时,裸土识别的准确度受水体的影响较大,黄土高原水体识别的复杂性和不确定性,为准确提取土壤线参数带来一定程度的影响,因此,后续研究中需进一步提高黄土高原水体识别的准确度,以提高自动提取算法的效果。

[参 考 文 献]

[1] Baret F, Jacquemoud S, Hanocq J B. About the soil line concept in remote sensing[J]. Advances in Space Research, 1993,13(5):281-284.

[2] Kauth R J, Thomas G S. The tasseled cap: A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT [C]//Proceeding of the Symposium on Machine Processing, Indiana, 1976:41-51.

[3] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1978,43(12):1541-1552.

[4] 武婕,李玉环,李增兵. 基于遥感影像的土壤线空间变异规律及影响因素分析[J]. 自然资源学报,2014,29(4):702-708.

[5] 刘焕军,张柏,宋开山,等. 基于室内光谱反射率的土壤线影响因素分析[J]. 遥感学报,2008,12(1):119-127.

[6] Galvão L S, Ícaro V. Variability of laboratory measured soil lines of soils from Southeastern Brazil[J]. Remote Sensing of Environment, 1998,63(2):166-181.

[7] Huete A R. A soil adjusted vegetation index(SAVI)[J]. Remote Sensing of the Environment, 1988,25(3):295-309.

[8] Baret F, Guyot G, Major D J. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation [C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989. IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989 International. IEEE, 1989:1355-1358.

(下转第 172 页)

致谢: 本文在写作过程中, 使用的数据包括 STRM 数据平台的 DEM 数据, 以及甘枝茂先生的黄土高原地区地貌分区图。在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 291-306.
- [2] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [3] 张维. 基于 DEM 的陕北黄土高原流域剖面谱研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [4] 张会平, 刘少峰. 利用 DEM 进行地形高程剖面分析的新方法[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 226-226.
- [5] 郭兰勤, 丑述仁. 基于 DEM 不同路径算法的沟壑密度提取[J]. 地下水, 2011(6): 145-147.
- [6] 张磊, 汤国安, 李发源, 等. 黄土地貌沟沿线研究综述[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(6): 44-48.
- [7] 张法. 地图信息量的量测和评价[J]. 测绘, 2006, 29(1): 21-24.
- [8] Zhilin Li, Peizhi Huang. Quantitative measures for spatial information of maps[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(7): 699-709.
- [9] 汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [10] Peters S. Interactive scale-dependent multidimensional point data selection using enhanced polarization transformation[J]. Journal of Dental Research, 2011, 81(4): 253-258.
- [11] 邓敏, 樊子德, 刘慧敏. 层次信息量的线要素化简算法评价研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(5): 767-773.
- [12] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(03): 201-222.
- [13] 王万忠, 焦菊英, 马丽梅, 等. 黄土高原不同侵蚀类型区侵蚀产沙强度变化及其治理目标[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 1-7.
- [14] 邹斌文, 马维峰, 龙昱, 等. 基于 ArcGIS 的条带剖面提取方法在地貌分析中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(3): 42-44.
- [15] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 121-124.
- [16] 管华. 秦岭—黄淮平原交界带地貌信息熵分析[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 1996, 26(4): 67-71.
- [17] 詹志明, 秦其明, 阿布都瓦斯提·吾拉木, 等. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法[J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36(11): 1020-1026.
- [18] 刘焕军, 宇万太, 张新乐, 等. 中国东北黑土带土壤线空间变异规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 166-170.
- [19] Fox G A, Sabbagh G J, Searcy S W. An automated soil line identification routine for remotely sensed images[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1326-1331.
- [20] 秦其明, 游林, 赵越, 等. 基于二维光谱特征空间的土壤线自动提取算法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 167-171.
- [21] XU Dandan, GUO Xulin. A Study of Soil Line Simulation from Landsat Images in mixed grassland[J]. Remote Sensing, 2013, 5(9): 4533-4550.
- [22] 杨国范, 翟光耀, 张婷婷, 等. 基于环境小卫星的土壤线提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 428-432.
- [23] 朱乐天, 焦峰, 刘源鑫, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 115-118.
- [24] 赵婷. 陕北延河流域结构性植被盖度遥感模型研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [25] 徐彬彬. 我国土壤光谱线之研究[J]. 环境遥感, 1991, 6(1): 61-71.
- [26] 毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 77-82.
- [27] 程磊, 徐宗学, 左德鹏, 等. 基于 Landsat TM 数据的黄土高原区水体识别方法研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 424-430.
- [28] 王伟武, 朱霞, 孙跃池, 等. 基于 ETM 图像的山地水体提取方法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2196-2200.
- [29] Mcfeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [30] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327-333.
- [31] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 8(2): 119-126.
- [32] 池宏康. 黄土高原地区提取植被信息方法的研究[J]. 植物学报, 1996, 38(1): 40-44.

(上接第 165 页)