

基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形 自动分割技术研究

周 毅¹, 汤国安¹, 王 春², 肖晨超³, 董有福¹, 孙京禄¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046 2 滁州学院国土
信息工程系, 安徽 滁州 239012 3 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: 黄土地貌正负地形自动分割是构建地表空间分布式机理-过程模型的基础。在分析黄土高原地区典型地貌坡面形态及汇流过程特征的基础上, 提出了基于 5 m 分辨率栅格 DEM 自动分割黄土正、负地形的技术方案。该方案首先利用坡面上下游栅格点的坡度对比识别沟沿线点, 然后利用汇水模型提取沟沿线点约束的上游汇水区域, 从而实现正、负地形的自动分割。在黄土塬区及丘陵沟壑区的实验结果表明, 该方法的优点是提取精度高, 人工干预少, 在不同地貌类型区域内有很好的应用适宜性。

关 键 词: 正负地形; 沟沿线; DEM; 自动分割; 黄土高原

中图分类号: P931.7/TP311.132 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2010)02-0261-06

特殊的地理位置, 典型的气候环境, 独特的成土条件, 使得黄土高原地区形成了千沟万壑、支离破碎的黄土地貌景观^[1, 2]。然而, 错综复杂的黄土地貌被该地区广泛分布的沟沿线划分为两大基本地貌单元, 即以沟间地为主的正地形区域和以沟谷地为主的负地形区域^[3, 4]。正、负地形在黄土高原地区物质与能量输移过程中扮演的角色不同, 导致了二者在地形结构、侵蚀方式、土地利用、植被覆盖等方面产生巨大差异。正、负地形单元及其组合形态特征是构建区域空间分布式机理-过程模型的基础地理参数^[5], 也是衡量地表侵蚀和地貌发育的重要指标。因此, 正、负地形单元的划分在黄土高原地貌研究中具有十分重要的意义^[6]。

然而, 直接在高分辨率航空像片上手动勾绘正负地形工作量巨大, 在地形图上的勾绘精度较低。而利用 DEM 数据及其所衍生出的一系列坡面信息作为数据源, 进行正负地形及沟沿线的自动识别技术, 已被公认为在效率、精度等方面有较大优势, 是大范围提取正负地形的有效手段^[7]。

目前, 基于栅格 DEM 数据, 自动划分黄土正、负地形的基本思想主要是从地貌形态学出发, 判断空间形态上满足正、负地形要求的地形单元, 进而

通过各种方法实现地形单元的归并。其中, 闫国年等基于地貌形态学基本特征单元的定义提出了沟沿线提取技术方法; 刘鹏举等利用特征点识别算法提取坡面汇流路径上的沟沿线点^[8, 9]。朱红春等利用邻域分析方法, 结合坡度、水文等地形信息, 实现正、负地形面域单元的提取^[10]。前二者重在提取精度, 后者重在效率。然而由于黄土地形的复杂性以及沟沿线本身所存在的局部断续性, 正、负地形面域单元的自动生成技术上还存在较多问题。本文在总结前人研究的基础上, 研究黄土坡面的形态特征及汇水过程特点, 提出基于沟沿线点约束汇水区域的正负地形分割新思路和新方法。

1 黄土典型地貌沟坡结构与坡面汇水特征

正、负地形的划分实质上是区划沟间地与沟谷地的过程^[1]。在黄土塬、残塬及以梁为主的丘陵沟壑地区, 沟沿线是二者的分界线^[1], 而在黄土峁状丘陵沟壑区, 峁边线是两者的主要天然界限^[2]。其实质上都是由于黄土土壤的湿陷性和垂直解理特性造成坡面上坡度陡然增加的区域, 所不同的是坡度的变化程度随地貌类型不同而有较大

收稿日期: 2009-05-12 修订日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40930531)、国家高技术研究发展计划(863计划)(2006AA12Z212)、国家青年自然科学基金资助项目(40801148)、安徽省自然科学基金项目(090412062)资助。

作者简介: 周 毅(1984-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事 GIS、RS及数字地形分析方面研究。E-mail: zhoyi1ucky@gmail.com

通讯作者: 汤国安, 教授。E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

差异。由于黄土峁、梁之间的过渡并不明显,习惯上将二者统称为沟沿线。

综合前人研究结果及野外考察发现,正负地形及沟沿线存在以下几个方面的特征:

1) 在黄土塬区,正地形主要由两部分微地貌类型构成:塬面及塬边坡面。负地形主要由切沟、冲沟构成。在黄土梁、峁状丘陵沟壑区,正地形主要由梁顶、峁顶及缓坡面构成。图 1 为地形要素比较完备的黄土塬区小流域沟道结构模型。

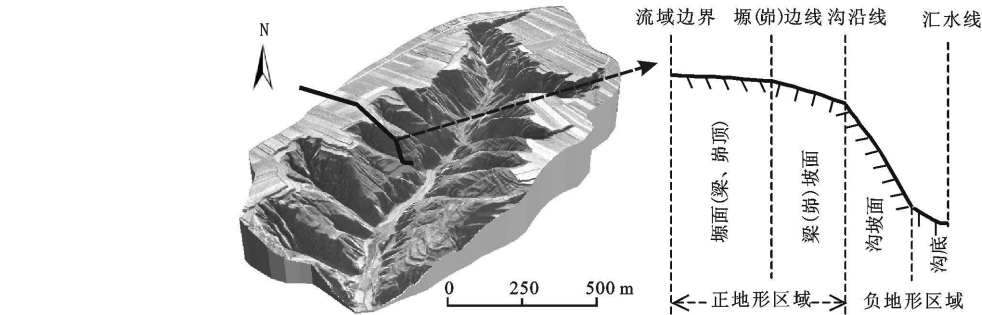


图 1 黄土高原地区典型沟谷剖面结构图

Fig 1 Transverse profile structure of typical loess gully on Loess Plateau

坡面汇流的出水口点。这一特点也是通过沟沿线点的约束来获取上游汇水区域,从而实现正、负地形分割的理论依据。

4) 沟沿线上下坡度差异存在着明显的空间分异特征。在黄土塬、黄土残塬地区,坡度变化大,切沟沟壁几乎垂直于水平面。在北部丘陵沟壑区,坡面地形由梁(峁)坡向沟坡过渡,坡度变化稍缓。然而,通过野外考察发现,无论是何种地貌类型,沟沿线处的坡度变化在整个坡面上都最大(表 1)。

表 1 黄土典型地貌类型区沟沿线上下平均坡度差异

Table 1 Slope differences up and down the shoulder lines in typical landforms

地貌类型	黄土塬区	黄土梁状丘陵沟壑区	黄土峁状丘陵沟壑区
坡度差异 (S_d)	$S_d > 30^\circ$	$30^\circ \geq S_d > 25^\circ$	$25^\circ \geq S_d > 20^\circ$

2 基于 DEM 正负地形自动分割技术

本文所设计的黄土正、负地形自动分割方法分 4 个步骤进行。首先根据坡面形态判断并标记沟沿线处的栅格点,然后通过基于坡面特征的定向膨胀算法,增加沟沿线栅格点数,继而以坡面汇水参数为指导,提取每个沟沿线点上游汇水贡献区域,所有

2) 在正地形区域内,侵蚀方式以降雨溅蚀及坡面汇流侵蚀为主,在坡面上形成纹沟、细沟。坡面汇水通过沟沿线,进入负地形区域以后,水流汇聚,侵蚀以沟蚀为主,同时伴随重力侵蚀,侵蚀加剧,多形成切沟,侵蚀泥沙汇入冲沟^[11]。

3) 沟沿线地处切沟、冲沟最为发育部位,其实质上为无数个微型切沟的沟头点的集合^[11]。上方坡面汇水在沟沿线处开始聚集,发生沟道侵蚀。从另一个角度来看,沟沿线上的点是正地形区域内

汇水区域的并集即为正地形区域,最后,将正负地形提取结果矢量化、整饰、编辑制作专题地图。

2.1 沟沿线栅格点的判断

基于高分辨率 DEM 数据对坡面形态的判断,主要利用两类地形因子。其一是坡向因子。坡面点坡面朝向的水平投影指向该点下游位置,从而可以确定坡面上栅格点上、下游位置关系。其二是坡度因子,主要用于判定某栅格点坡度及其上、下游栅格点坡度变异程度。具体来说判断条件主要包括:①目标点处坡度大于 α ②目标点下游区域坡度大于上游区域坡度,且两者之差绝对值大于 β ③该点剖面曲率大于 Q 其中, α 、 β 可选不同的阈值参数。在具体操作时,需设计 3×3 滤波算子。算子结构如图 2 左图所示,当中心点栅格坡面朝向如图中所示时(西北-东南走向),上下游栅格点位置分别为 1 和 2 号栅格。

如前文所述,沟沿线上下坡度差异随黄土地貌类型的改变而具有一定的空间分异规律,在实际操作中,应首先判断研究区域所属的地貌类型,对阈值 α 与阈值 β 进行合适的设定,从而可达到较好的提取效果^[12]。依据以上方法和原则,利用上述分析算子,对 5m 分辨率 DEM 数据进行扫描,当有满足上述所有条件的栅格点出现时,则标记之,直至

扫描完成整幅 DEM。

绝大部分识别出的沟沿线点具有正确的位置分布, 然而, 由于黄土地貌的复杂性, 在沟谷内部会出现少数散布的伪沟沿线点。为了避免影响后续分析, 这些点必须去除。剔除的主要算法是将邻接簇聚少于 5 个栅格点的候选点删除。经过该步骤处理以后, 孤立散布的伪沟沿线点就被全部去除。

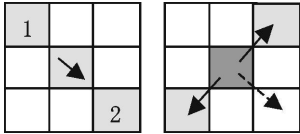


图 2 分析算子结构示意图

Fig 2 Structure of the arithmetic operators

2.2 定向膨胀

通过以上步骤探测出的沟沿线栅格点, 在个别位置会出现断点, 这与实际地形是相符的。然而, 沟沿线在区域尺度上是全局连续的, 并且断点会影响后续步骤中沟沿线栅格点上游汇水区域的判断, 使正地形内出现空漏区域。因此, 需尽量减少断点出现的情况。解决这一问题的有效方法是对已提取栅格点进行定向膨胀操作。

定向膨胀的理论依据为: 在局部范围内, 沟沿线延伸方向与坡面朝向垂直。基于这一思想, 进行如下操作: ①判断坡面方向; ②在 3×3 矩形分析窗口内, 沿与坡向垂直的两个方向各延伸一个栅格; ③如延伸后栅格处已存在标记栅格点, 则不延伸, 反之, 延伸并标记之。如图 2 右图所示, 处在中心位置的深灰色栅格为已探测出的沟沿线栅格点, 虚线箭头为坡面朝向, 实线箭头为膨胀延伸方向, 所指的浅灰色栅格为膨胀后标记栅格。

通过以上操作, 增加了沟沿线栅格点的连续性。在少数沟头处出现的断续, 可通过手工稍加编辑, 使其更为连续 (图 3)。

2.3 正、负地形区域生成

正、负地形面状区域的生成, 需要将以上步骤所提取出的沟沿线栅格点连接成矢量线。然而在实际操作中, 栅格-矢量的转换操作会遇到诸多问题, 这也是目前沟沿线自动提取所遇到的难点问题。首先, 沟沿线栅格点随沟谷边缘蜿蜒曲折, 矢栅转换时极易出现错误; 其次是仍然存在少量的断点, 使得连续的矢量格式沟沿线的生成存在困难。鉴于此, 本文转换思维方式, 避开点线连接的方法,

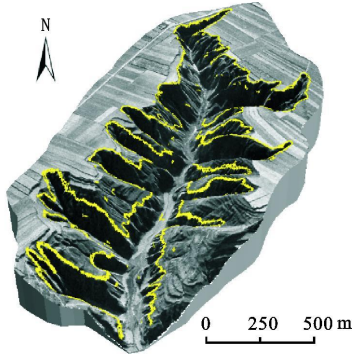


图 3 提取出的沟沿线栅格点

Fig 3 The extracted shoulder line points

从坡面汇水过程的角度寻求解决这个问题的办法。

当坡面接受降水后, 坡面正地形区域内汇水都经过沟沿线流入下游沟道内。在汇流过程中, 沟沿线是上部正地形区域汇流的必经之路。因此, 对于正地形区域的提取, 只需提取上步所获得的所有沟沿线栅格点的上游汇水区域, 然后求其并集即可获得正地形区域。

该步骤采用 O' Callaghan 等的水文分析算法, 利用 ArcGIS 9 中水文分析模块实现^[13]。首先对数据进行填洼处理, 生成汇流方向矩阵。然后根据汇流矩阵以及沟沿线点位数据, 计算每个沟沿线栅格点的上游汇水面积。如果沟沿线点不出现断点的话, 所生成的上游汇水面积的并集即为正地形区域。在实际操作中, 沟沿线点难免出现个别断点, 可通过后期操作, 稍作编辑整饰, 形成完整的正地形区域。

3 实例分析

3.1 实验数据

顾及到提取方法应用适宜性的检验, 本文在具有典型地貌类型代表性的黄土塬区 (宜君) 黄土梁状丘陵沟壑区 (延安) 以及黄土崩梁丘陵沟壑区 (绥德) 内分别选择 2 个小流域作为实验样区。以西安测绘局在 2006 年生产的, 1:10 000 比例尺、5 m 分辨率 DEM 作为基本数据源, 进行沟沿线栅格点及正负地形的提取。

在提取结果检验中, 相对真值的获取应独立于 DEM 数据本身。在 1 m 分辨率 DOM 数据上可清晰的识别沟沿线位置, 因此, 本文利用在 DOM 数据上手动勾勒的正负地形作为精度评价标准。DOM 数据和上述 DEM 数据比例尺与生产时期相

同,并经过正射校正,和 DEM 数据严格配准。

3 2 精度评价

影响正负地形提取结果的因素主要包括两个方面: DEM 数据的质量以及提取算法的合理性。因此,同时又要兼顾可实现性以及在各种地貌类型中的应用适宜性。

精度检验主要考察两个方面指标:其一是用本文方法所提取的正地形面积与基于 DOM 数据所获取的相对真值之间的面积偏差,其二是沟沿线与

相对真值之间的偏移距离。

检验结果如表 2所示。在 6 个小流域内,利用本文所设计方法提取出的正地形面积和真值之间最大偏差在 1.15 km² 以内。并且,正负地形的分界线——沟沿线偏移标准结果在 10 m 以内(2 个栅格单元)的栅格点占 93% 以上。由此可见,本文所设计的方法最大的优势在于提取精度较高,人工干预成分少,具有多地貌类型的应用适宜性。图 4 为黄土小流域正、负地形自动分割结果。

表 2 提取结果与标准结果对比
Table 2 Contrast between the auto-extraction result and the reference result

流域 ID	地貌类型	总面积 (km ²)	正地形面积 (DOM)	正地形面积 (DEM)	面积绝对 误差	偏移 10 m 以内 栅格数百分比
1	黄土塬区	42.38	30.23	31.04	0.81	97.4%
2	黄土塬区	37.33	26.71	27.20	0.49	98.2%
3	梁状丘陵沟壑区	16.32	9.52	8.37	1.15	95.7%
4	梁状丘陵沟壑区	8.97	5.11	4.59	0.52	97.6%
5	崩塌丘陵沟壑区	12.22	6.43	5.76	0.67	96.4%
6	崩塌丘陵沟壑区	4.68	2.36	2.27	0.09	98.6%

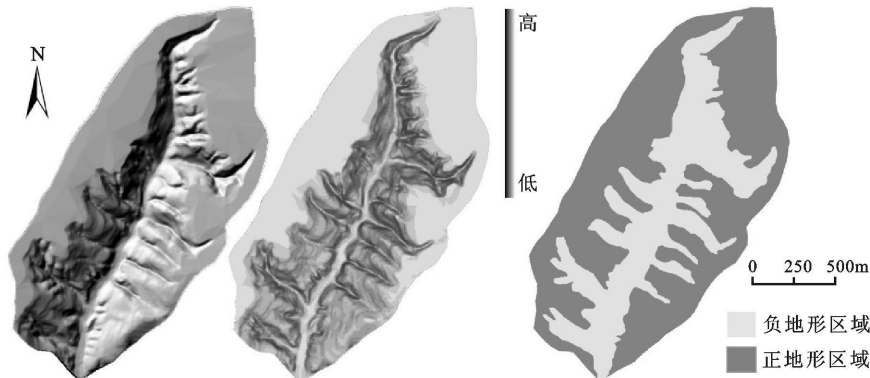


图 4 黄土地貌小流域正、负地形自动分割结果

Fig 4 The auto-extracted positive and negative terrains in watershed on Loess Plateau

4 结论与讨论

本文在分析黄土高原地区沟道坡面模型的基础上,总结了典型黄土地貌正、负地形的划分方法。在此基础上,基于坡面形态特征,结合黄土坡面自然地表汇水过程特点,研究利用高分辨率数字高程模型自动分割正、负地形的新技术。本文所提出的方法规避了单纯依靠坡面形态进行沟沿线提取时所遇到的连点成线较为困难的问题,从坡面汇水机理入手,获取以沟沿线点为出水口的上游汇水区域,从而实现正地形的自动提取。实验结果表明,该方法提取精度高,人工干预成分少,在不同地貌

类型样区具有较好的应用适宜性。

地表形态是四大圈层相互作用的结果,形态特征是表象,形成过程是内因。在提取地形特征线时,当利用形态特征判别条件不足以很好解决问题时,可以考虑利用其物质能量迁移过程特点,转变思维,设计算法,可达到柳暗花明又一村的效果。

参考文献:

[1] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究 [J]. 地理科学, 1986, 6(4): 340~347
[2] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟道类型 [J]. 地理科学, 1984, 4(4): 321~332
[3] 蒋德麒. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析 [J]. 地理学报,

1966 **32**(1): 20~ 35.

[4] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区沟间地与沟谷的地貌类型 [J]. 地理学报, 1956 **22**(3): 201~ 222

[5] 闫国年, 钱亚东, 陈钟明. 流域地形自动分割研究 [J]. 遥感学报, 1998 **2**(4): 298~ 304.

[6] 桑广书, 陈雄, 陈小宁, 等. 黄土丘陵区地貌形成模式与地貌演变 [J]. 干旱区地理, 2007 **30**(3): 375~ 380.

[7] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005 338~ 354.

[8] 闫国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型自动提取地貌沟沿线技术研究 [J]. 地理科学, 1998 **18**(6): 567~ 573.

[9] Liu P J, Zhu Q K, Wu D - L, et al Automated extraction of shoulder line of valleys based on flow paths from grid Digital Elevation Model (DEM) data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, **28**(4): 72~ 76

[10] 朱红春, 汤国安. 基于 DEM 提取黄土丘陵区沟沿线 [J]. 水土保持通报, 2003 **5**(23): 43~ 45.

[11] 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.

[12] Tang G A, Xiao C C, Jia D X, et al DEM based investigation of loess shoulder - line [C] // Chen J M, Pu Y X. Proceedings of SPIE. Geoinformatics 2007 Geospatial Information Science Bellingham: SPIE, 2007 6753 67532E.

[13] O' Callaghan J Mark D, Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis [J]. Geoderma, 2002, **107**: 1~ 43.

[14] 周德民, 程进强, 熊立华. 基于 DEM 的洪泛平原湿地数字水系提取研究 [J]. 地理科学, 2008, **28**(6): 776~ 781

[15] 闫满存, 王光谦. 基于 GIS 的澜沧江下游区滑坡灾害危险性分析 [J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 365~ 370

[16] 高玄戋. 地貌形态分类的数量化研究 [J]. 地理科学, 2007, **27**(1): 109~ 114.

[17] Jozef M, Ian E. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping [J]. Geomorphology, 2008 **95** 236~ 259

[18] Demoulin A, Bovy B, Rixho G, et al An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium [J]. Geomorphology, 2007, **91** 51~ 64.

[19] Hossein S, Robert B, Forood S, et al Landform classification from digital elevation model and satellite imagery [J]. Geomorphology, 2008 **100** 453~ 464

Automatic Segmentation of Loess Positive and Negative Terrains Based on High Resolution Grid DEMs

ZHOU Yi¹, TANG Guo-an¹, WANG Chun², XIAO Chen-chao³, DONG You-fu¹, SUN Jing-lu¹

(1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046 2 Land Information Engineering Department, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239012 3 Institute of RS and GIS, Peking University, Beijing 100871)

Abstract China Loess Plateau is world-wide famous for its peculiar and unique landscape in which the loess shoulder lines zigzag on the surface making a distinct separation between loess positive terrain and the negative one. The automatic segmentation of loess positive and negative terrains (P-N terrains) with precise location and high efficiency, which is a crucial technique in constructing the mechanism-process models of loess landform drainage systems, is still need to be further improved. Nowadays, with the increasing availability of digital topographic data, the Digital Elevation Model (DEM) can now be applied to better description of natural topography, and it is also regarded as the most proper data source for automatic extraction of loess positive and negative terrains. In this paper, the conformation and flow confluence characteristic of the hill-slope in representative loess landforms is discussed. Based on this, an auto-segmentation method of P-N terrains from 5 m resolution DEMs is proposed. There are three key procedures in the operation. The first step is the identification of grid points on the shoulder-line position by considering the slope difference up and down. Slope gradient 30°, 25° and 20° are used as the thresholds in loess platform area, loess ridge-hill area and loess hill area respectively in the extraction model. The second stage is to expand shoulder-lines' candidate cells directionally by considering the spatial direction of the local hill slope aspect and the trend of the shoulder lines. This step is helpful for deriving more

consecutive and detailed shoulder-lines on DEM s. The third step is the generation of positive terrain which can be regarded as the extraction of the upstream area of the shoulder-line points by using the hydrologic analysis model. All the shoulder-lines' cells derived above are imported into the model as the pour point data. This is an alternative method for evading the difficulty of converting shoulder-line grid cells into consecutive vector lines. Validation tests are took out by contrasting the auto-extraction results from DEM s and the delineating results from 1 m resolution DOM s in six drainages. Results show that maximum area difference between the positive terrain area derived above and actual area is 1.15 km², and the percentage of the cells distance offset values less than 10 m exceed 95%. So the main advantages of this approach are high accuracy, lower demands on manual intervention and ready availability of required data for many regions on the Loess Plateau. The morphology of the earth surface is the interactional production of the hydrosphere, lithosphere, atmosphere and the biosphere; thus the morphology is the external representation, and the interaction process is the inner dynamical force. The extraction of the topographic feature lines not only need considering the characteristic of the terrain morphology, but also need considering the inner mechanism of land surface process.

Key words positive terrain; negative terrain; shoulder-line; DEM; auto-segmentation; Loess Plateau

书 讯

由中国科学院东北地理与农业生态研究所王化群教授所著、吉林科学技术出版社 2009年 12月出版的《沼泽、湿地和土地资源的制图与可持续利用研究》一书,是著者 40多年来从事自然地理、沼泽、湿地和土地资源等调查与制图研究的部分重要成果。全书主要涵盖两大部分:一为沼泽、湿地和土地资源的制图部分,包括沼泽图、泥炭图、湿地图、土地类型图(或地方型图)、土地利用图和土地资源图的编制意义、基本内容、图型设计与表现方法、编绘方法及有关技术处理;二为沼泽、湿地和土地资源的可持续利用,包括沼泽、湿地、土地类型(自然景观)的形成因素分析、分类,沼泽、湿地和土地资源目前利用的现状特征、评价、存在问题、及保护、开发、改良、利用的措施。当今世界人口与资源、能源、粮食和环境矛盾日益突出,包括沼泽在内的湿地和土地资源的可持续利用及环境保护工作引起各国政府和科技界的高度关注。本书的出版对于深入开展我国湿地图和土地资源图的制图工作,与湿地和土地资源的可持续利用工作,发展农林牧业生产和维护生态平衡及保护环境,有重要理论和实践参考价值。

本书可供从事湿地、土地资源、自然地理、地理制图、环境保护与农、林、牧等科技工作者,以及有关院校师生参考。