

太阳辐射模拟的 DEM 尺度影响因素分析

杨 昕, 汤国安, 肖晨超

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210097)

摘要: 利用 DEM 分析方法为起伏地形下太阳辐射模拟提供了条件。然而 DEM 的尺度效应对太阳辐射模拟产生很大的影响。本文以黄土丘陵和秦岭高山为实验样区, 以一系列不同分辨率的 DEM, 模拟日、月及年总天文辐射, 比较其误差大小及地形分析的差异。实验结果显示, 随着 DEM 栅格分辨率的降低, 天文辐射逐渐增大; 当栅格分辨率大于地面相对高差时, 模拟的天文辐射基本稳定, 坡向、坡度等地形因子对辐射的再分配作用已不显著。黄土丘陵区, 当 DEM 分辨率接近 1000m 时, 天文辐射年总量的相对误差为 22%, 超过该区域一个冬季的天文辐射量。秦岭山区地表起伏大, 误差较黄土丘陵地区小, 最大相对误差为 17.8%。总之, 地表起伏越小, DEM 栅格分辨率对太阳辐射模拟的影响越大。

关键词: DEM; 分辨率; 天文辐射; 敏感性分析

1 引言

山地丘陵地区, 接受的太阳辐射深受地表起伏形态的影响。我国学者左大康 (1991)、翁笃鸣 (1988)、傅抱璞 (1989) 等人建立了符合我国实际情况的太阳总辐射及其分量的计算模型^[1-3], 奠定了太阳辐射模拟的模型基础。数字高程模型地形分析方法的不断完善为山区太阳辐射模拟提供了方法基础。Dozer (1990) 首次提出以 DEM 为基本信息源的太阳辐射计算方法^[4]; 我国学者李新 (1996)、曾燕 (2003)、杨昕 (2004) 等分别对不同的区域, 采用不同尺度的 DEM 数据进行太阳辐射模拟研究^[5-7], 取得了丰富的成果。然而, 以上研究均未考虑 DEM 的尺度效应对模拟结果的影响程度。栅格分辨率是决定 DEM 地形描述精度的一个重要的空间尺度参数, 随着分辨率的变化, DEM 提取的坡度、坡向以及地形遮蔽信息随之产生很大差异^[8,9], 不同程度的影响模拟结果的准确性。由于天文辐射是直接辐射的基础数据, 成为总辐射的重要组成部分。因此本文以陕北黄土丘陵和秦岭山区为实验样区, 以不同栅格分辨率的 DEM 为基础数据源, 研究天文辐射随 DEM 比例尺的变化规律、误差大小及传播特征。

2 实验样区与数据分析

本文以陕北典型的黄土丘陵沟壑区 (黄土丘陵) 和秦岭山区 (高山) 为实验区 (见图 1)。黄土丘陵区位于陕西延川县城西南部延河中游地区, 地处 109°52'30"~110°00'00"E; 36°42'30"~36°47'30"N, 约 21km²。相对高差 328m, 沟谷深切, 地面破碎, 平均坡度 27°; 属暖温带大陆季风半干旱气候。

秦岭山区位于陕南周至、佛坪县交界处, 秦岭山脉主峰上, 地处 107°59'37"~108°15'21"E; 33°39'38"~33°50'23"N, 约 92km², 高差 1 734m, 地面平均坡度 31°。属于亚热带大陆季风湿润气候。

上述实验依据国家测绘局 DEM 生产标准, 利用地形图数字化生成的 DEM 栅格分辨率分别为 5m 和 25m, 黄土丘陵地区 1:1 万 DEM 和秦岭山区 1:5 万 DEM 数据, 高斯克吕格投影, 1980 西安坐标系。在此基础上, 通过重采样, 生成一系列不同栅格分辨率的 DEM 数据。

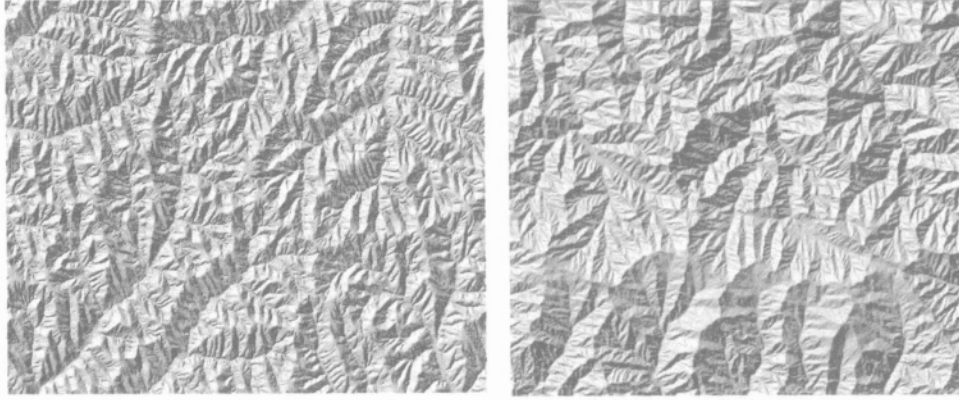
3 太阳辐射模拟的实验方法

不同尺度的 DEM 提取的地形因子存在很大的变异性, 影响辐射模拟结果的精度。天文辐射是直

收稿日期: 2006-04-13; 修回日期: 2006-07-11.

资助项目: 国家自然科学基金项目 (40571120), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20050319006) 资助。

作者简介: 杨昕 (1976-), 女, 陕西西安人, 博士生, 主要研究从事 DEM 数字地形分析和遥感应用。E-mail: xxinyang@163.com



a. 黄土丘陵

b. 秦岭山地

图 1 实验样区晕渲图

Fig.1 The hillshade map of test area

接辐射的基础, 进而也是总辐射的重要组成部分, 天文辐射模拟的准确性影响直接辐射和总辐射的计算精度。因此, 本文以天文辐射模拟为基础, 探讨天文辐射计算精度对 DEM 分辨率的敏感性。

3.1 天文辐射模型

$$S_0 = \frac{I_0 TE_0}{2} \sum_{i=1}^n [\sin(\theta_{si} - \theta_{ri}) + v \cos(\sin \theta_{si} - \sin \theta_{ri}) - \cos(\cos \theta_{si} - \cos \theta_{ri})g]$$

$$u = \sin \theta_{si} \cos \theta_{ri} - \cos \theta_{si} \sin \theta_{ri} \cos \theta_{ri}$$

$$v = \sin \theta_{si} \sin \theta_{ri} \cos \theta_{ri} + \cos \theta_{si} \cos \theta_{ri}$$

$$= \sin \theta_{si} \sin \theta_{ri}$$

其中, S_0 为起伏地形下, 任一栅格单元的天文辐射量, I_0 为太阳常数, T 为日长, E_0 为地球轨道修正因子^[1-3], θ_{si} 为地理纬度, θ_{ri} 为坡度, θ_{ri} 为坡向, n 为可照时角的离散数目, θ_{ri} 和 θ_{si} 为微分时段内的日出和日没时角, g 为地形遮蔽度^[56]。模拟方法是以 DEM 为基础数据, 计算坡度、坡向以及地形遮蔽等地形因子, 应用多层次复合分析, 分时段逐个栅格的计算天文辐射量。

3.2 实验流程

由模型可知, 影响天文辐射的地形因子有坡度、坡向和地形遮蔽度。因此, 通过对不同分辨率 DEM 提取地形因子的差异性分析, 探讨其对天文辐射模拟的影响程度。实验方法如下:

(1) 多分辨率 DEM 的生成。由于 1 10 000 DEM 在一定程度上较为真实地反映了地表形态, 因此以

1 10 000 DEM 为基准, 分别以 3 × 3、5 × 5、7 × 7 等窗口重采样(即 10m 的采样间隔), 依次类推、逐次采样至 105m; 在 105m 以上, 由于地形因子的计算结果对于 DEM 分辨率的敏感性显著降低, 因此采用 50m 采样间隔, 逐次采样至 1005m。为了避免内插, 保证地形的相似性。采样方法为直接抽取 1 10 000 DEM 网格中心点值。秦岭地区, 由于样区范围较大, 以 1 50 000 DEM 为基础数据源进行采样。

(2) 天文辐射量的模拟。针对不同栅格分辨率 DEM 进行太阳天文辐射量的模拟^[6,7]。其中, 最关键的是确定每一栅格单元的可照时间, 首先, 将一天可照时间离散化, 在每一微分单元内, 判断太阳高度和太阳方位, 利用光线追踪算法判断是否有遮蔽并记录, 最后累加求和, 获得天文辐射日总量。具体模拟方法参见文献 7。这里以每月的代表日作为该月平均日辐射量。

(3) 模型建立: 建立天文日辐射量随 DEM 分辨率的变化模型, 确定不同尺度 DEM 的模拟误差, 为统计数值纠正提供依据。

(4) 天文辐射的地形分析: 分析不同坡度、坡向下, 天文辐射随 DEM 栅格分辨率的变化趋势及对辐射模拟的影响程度。

4 模拟结果分析

4.1 天文日辐射量

图 2 显示, 随着 DEM 分辨率的降低, 两个实验样区日均辐射量逐渐增大。随着 DEM 栅格单元增

大,地形表面不断被平滑,地形起伏降低,日照时间受地形遮蔽的影响减弱,并越来越接近平地的情況,导致模拟的辐射量增大。图 2 显示两样区的增长速度不同。黄土丘陵地区,栅格分辨率在 200m 之前,日辐射量增长较快;分辨率超过 350m,辐射量不再增长,趋于平稳,其模型见公式 3。其中, X 为 DEM 栅格大小(m), S 为日天文辐射量(MJ/m²)。当 X 大于 350m 时,辐射量不再变化。这个临界值接近于黄土丘陵样区的平均高差,说明,当 DEM 栅格大于样区的切割深度时,地形作用不再明显,因此,模拟的辐射量不再改变。相对于黄土丘陵,秦岭山地的日均辐射量增长较为缓慢。这是由于山地相对高差较大,当 DEM 栅格单元增大时,对地形的平滑作用远不如黄土丘陵地区。因此,辐射量增长缓慢而平稳。

$$S_{\text{loss}}=3 \times 10^{-7} X^3-2 \times 10^{-4} X^2+0.052 X+23.984$$

$$(X \ 350) \ R^2=0.99 \quad (3)$$
$$S_{\text{mountain}}=1 \times 10^{-8} X^3-2 \times 10^{-5} X^2+0.0169 X+24.641$$
$$(X \ 1000) \ R^2=0.99 \quad (4)$$

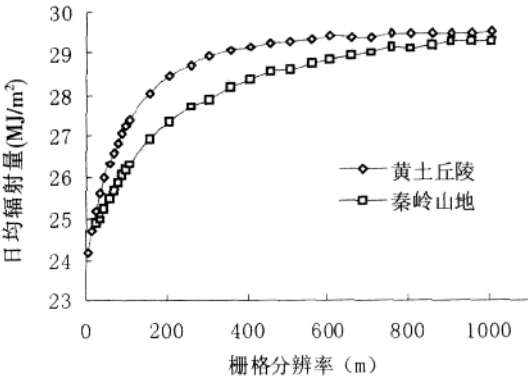


图 2 日均辐射量随分辨率的变化

Fig.2 Variations of daily average radiation with DEM resolution

表 1 不同栅格分辨率下天文辐射年总量统计

Tab.1 Statistics of annual total astronomic radiation at different grid cell sizes

栅格分辨率 (m)	黄土丘陵			秦岭山地		
	年总量 (MJ/m ²)	误差 (MJ/m ²)	相对误差 (%)	年总量 (MJ/m ²)	误差 (MJ/m ²)	相对误差 (%)
5	8824.24	0.00	0.00	—	—	—
15	9003.66	179.42	2.03	—	—	—
25	9190.87	366.63	4.15	9083.95	0	0
35	9350.64	526.40	5.97	9114.34	30.39	0.33
45	9487.30	663.06	7.51	9213.38	129.43	1.42
55	9605.71	781.46	8.86	9292.42	208.47	2.29
65	9702.18	877.94	9.95	9361.96	278.00	3.06
75	9798.02	973.78	11.04	9438.24	354.29	3.90
85	9872.32	1048.08	11.88	9494.50	410.55	4.52
95	9944.87	1120.62	12.70	9551.22	467.27	5.14
105	10001.80	1177.56	13.34	9602.31	518.35	5.71
155	10242.70	1418.46	16.07	9830.16	746.21	8.21
205	10385.34	1561.10	17.69	9975.26	891.31	9.81
255	10477.44	1653.20	18.73	10116.33	1032.38	11.36
305	10558.43	1734.19	19.65	10190.43	1106.48	12.18
355	10602.63	1778.38	20.15	10286.25	1202.30	13.24
405	10643.80	1819.55	20.62	10359.14	1275.19	14.04
455	10678.21	1853.97	21.01	10414.92	1330.96	14.65
505	10698.44	1874.20	21.24	10446.14	1362.19	15.00
555	10719.30	1895.06	21.48	10482.66	1398.71	15.40
605	10742.12	1917.88	21.73	10527.13	1443.17	15.89
655	10733.22	1908.98	21.63	10564.53	1480.58	16.30
705	10725.44	1901.20	21.55	10600.24	1516.29	16.69
755	10754.87	1930.62	21.88	10637.27	1553.32	17.10
805	10758.33	1934.09	21.92	10624.68	1540.73	16.96
855	10754.44	1930.20	21.87	10665.15	1581.20	17.41
905	10761.81	1937.56	21.96	10694.69	1610.74	17.73
955	10766.60	1942.35	22.01	10701.71	1617.76	17.81
1005	10783.56	1959.32	22.20	10702.28	1618.33	17.82

4.2 天文辐射年总量对比

1 10 000 DEM 能够较为精确地描述地表形态, 提取的地形因子也最为准确, 因而模拟的天文辐射量也最为精确。因此, 以 1 10 000 DEM 模拟值为准值, 统计不同分辨率下模拟误差的大小, 见表 1。黄土丘陵地区, 当 DEM 分辨率为 25m 时, 天文辐射年总量的误差相当于该区域第 12 月的辐射量; 当 DEM 栅格大于 105m 时, 误差量均大于该区域一个冬季的辐射总量 ($1\,333.7\text{ MJ/m}^2$), 相对误差最大为 22.2%。对于秦岭山地, 辐射误差增长较为缓慢; 当栅格分辨率为 95m 时, 误差相当于该区域第 12 月的辐射量 (428.8 MJ/m^2); 当分辨率为 155m 时, 误差接近于月平均辐射量 (753.68 MJ/m^2); 当 DEM 栅格大于 605m 时, 误差大于该区域一个冬季的辐射量 ($1\,424.6\text{ MJ/m}^2$), 最大相对误差为 17.8%。

秦岭山地相对高差大, 地形遮蔽作用显著。随着 DEM 分辨率的降低, 其地形的平滑作用远不如黄土丘陵地区大, 辐射误差的增长也较为缓慢。因此, 辐射模拟时, 相对高差大的山地, 其模拟值对 DEM 栅格分辨率的敏感程度不如相对高差小的丘陵地区。

4.3 天文辐射的地形要素分析

天文辐射量模拟中, 坡度、坡向和地形遮蔽度是基于 DEM 提取的地形因子。随着 DEM 栅格分辨率的不同, 这些地形因子相应发生了很大的变化, 影响辐射量模拟精度。

(1) 坡度: 图 3、4 显示, 随着 DEM 分辨率的降低, 提取的坡度显著降低。可看出由于栅格分辨率的不同, 同一地区的坡度发生很大变化, 黄土丘陵地区由坡度最大的 32 降低至 1°; 因而对天文辐射模拟的准确性产生影响。图 4 为日均辐射量随平均坡度的变化趋势。可以看出, 秦岭山地和黄土丘陵具有同样的变化趋势: 日平均辐射量与平均坡度之间存在线性负相关, 即坡度越小, 天文辐射量越大。因此, 当 DEM 栅格单元的增大时, 不断平滑地表起伏, 基于窗口分析的坡度提取值显著减小, 天文辐射模拟值逐渐增大, 并越来越接近于平地辐射量。

(2) 坡向: 图 5 为两样区 8 个坡向辐射均值, 随栅格分辨率而变化的趋势。随着 DEM 栅格分辨率的降低, 各个坡向下天文辐射量发生不同程度的变化, 并最终趋于同一数值。北、东北、西北三个坡向的天文辐射量, 随着 DEM 栅格单元的增大而逐渐

增大。东、西坡的天文辐射先缓慢增加, 后趋于平稳。南、东南、西南坡, 在 DEM 栅格分辨率小于 200m 时先略微增大, 再逐渐减小, 之后趋于平稳。可见随着 DEM 栅格分辨率的降低, 阴坡辐射增加最快。这是由于栅格分辨率降低, 地形不断被平滑, 导致平均高差降低、地形遮蔽减少; 加之基于窗口的坡向计算方法的局限性, 导致各个坡向的比例发生变化, 因此, 阴坡的辐射量逐渐增大。其中, 黄土丘陵地区, 各个坡向辐射均值随栅格单元增大时, 迅速地趋向集中, 其集中程度较秦岭山区高。这是由于黄土丘陵地区地表起伏小, 当栅格分辨率大于 400m 时, 坡向对辐射分布的地形影响不再显著。而秦岭山区高差大, 虽然分辨率已降低至 1000m, 坡向仍具有一定的作用。因此, 当 DEM 栅格大小超过该地区的最大高差时, 坡向对辐射的局地再分配作用已不显著。

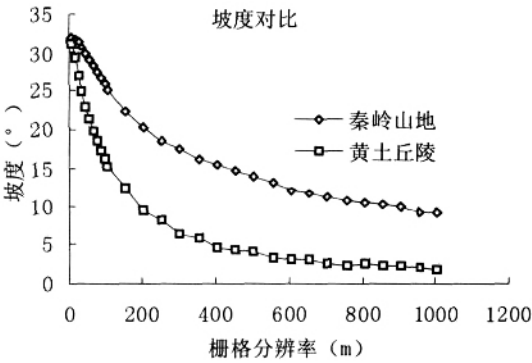


图 3 坡度随栅格分辨率的变化

Fig.3 The trend of average slope along with DEM grid cell size

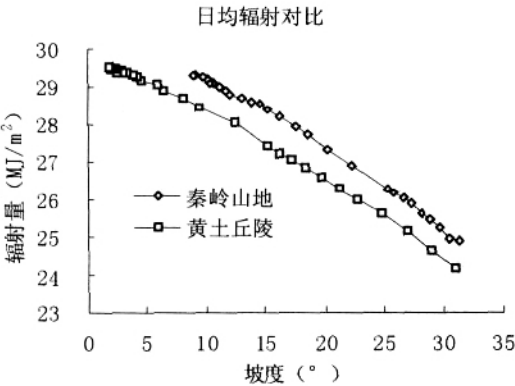


图 4 天文辐射量随坡度的变化

Fig.4 The trend of astronomic radiation along with slope

5 结论与讨论

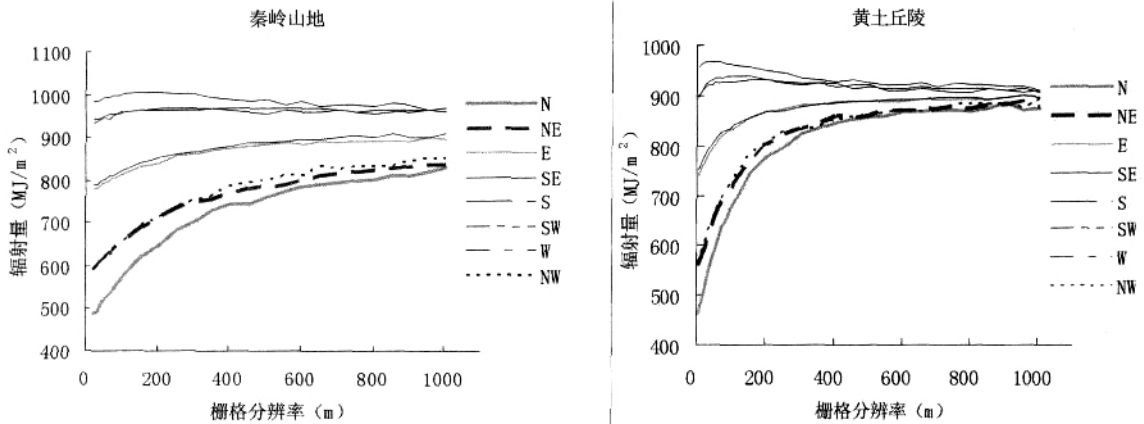


图5 各个坡向下辐射均值随分辨率的变化图

Fig.5 Variation of average radiation with grid resolution at different aspects

(1) 不同尺度 DEM 模拟的天文辐射量具有很大的差异性。随着 DEM 栅格单元的增大, 模拟的辐射量有先迅速增大后趋于平稳的增长趋势。黄土丘陵地区, DEM 栅格在 350m 以前, 天文辐射量增长迅速, 之后天文辐射量不再增长。秦岭山区, 天文辐射量随 DEM 缓慢持续增长。

(2) 若以 1 10 000 DEM 模拟的天文辐射量为准值, 天文辐射年总量的误差随 DEM 栅格大小和地貌类型不同略有差异。黄土丘陵区, 当栅格分辨率为 25m 时(即 1 50 000 DEM), 误差相当于冬季一个月份的天文辐射量; 当栅格分辨率大于 105m 时(小于 1 250 000 DEM), 误差超过该区一个冬季的天文辐射总量。秦岭山地起伏较大, 误差增长缓慢。当栅格大于 605m 时, 误差大于该区一个冬季的辐射量, 最大相对误差为 17.8%。可见, 地表起伏越小, DEM 栅格分辨率的影响越大。

(3) 统计发现, 坡度与辐射呈反比趋势。随着 DEM 栅格单元的增大, 坡度显著降低, 天文辐射量逐渐增大。随着栅格分辨率的降低, 各个坡向的平均辐射量逐渐趋于同一值。黄土丘陵地区, 当 DEM 栅格大于 400m 时, 各个坡向统计值基本相同。此时, 坡向对局地辐射的再分配已没有作用。

(4) 天文辐射是太阳直接辐射、总辐射模拟等

的基础, 需进一步研究 DEM 分辨率对更具实际意义的总辐射的影响程度, 为总辐射的数值纠正提供依据。

参考文献

- [1] 左大康, 周允华, 项月琴 等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 傅抱璞, 虞静明, 卢其尧. 山地气候资源与开发利用. 南京: 南京大学出版社, 1996.
- [3] 翁笃鸣. 中国辐射气候. 北京: 气象出版社, 1997.
- [4] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28 (5): 963~969.
- [5] 李 新, 程国栋, 陈贤章 等. 任意条件下太阳辐射模型的改进. 科学通报, 1999, 5: 993~998.
- [6] 曾 燕, 邱新法, 刘昌明 等. 基于 DEM 的黄河流域天文辐射空间分布. 地理学报, 2003, 58(6): 810~816.
- [7] 杨 昕, 汤国安, 王 雷. 基于 DEM 的太阳总辐射模型及实现. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 41~44.
- [8] 汤国安, 龚健雅, 陈正江 等. 数字高程模型地形描述精度模拟量化研究. 测绘学报, 2001, 30(4): 361~365.
- [9] 汤国安, 赵牡丹, 李天文 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性. 地理学报, 2003, 58(6): 824~830.

Effect of DEM Resolution on Simulation of Solar Radiation

YANG Xin, TANG Guoan, XIAO Chenchao

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210097, China)

Abstract: The development of digital terrain analysis based on DEM is helpful for the simulation of solar radiation in rugged area. However the effect of DEM scale causes great uncertainty to the simulation. Taking loess hilly area and Qingling Mountain as test area, this paper studies the relationship between simulated astronomic radiation and DEM resolution through simulating daily, monthly and yearly astronomic radiation based on a serial of DEMs with different resolutions. The experimental result shows that simulated astronomic radiation increases gradually with the decrease of DEM resolution. When DEM grid cell size is greater than the relative heights of the test area, the radiation simulated is stable and the terrain factors such as slope gradient and aspect do not affect on the redistribution of solar radiation any more. In loess hilly area, when DEM grid cell sizes close to 1 000m the relative error of the annual astronomic radiation is about 22%, exceeding the winter 's radiation in this area. In Qingling mountainous area, errors are relative small and the maximum relative error is 17.8%. In a word, the impacts of DEM resolution on the simulation of the solar radiation are much greater in hilly area than in the mountainous area.

Key words: DEM; resolution; astronomic radiation; sensitive analysis

上接 P8

Oil- field Data Management Solution Using ArcGIS

HUANG Guangyu¹, SHEN Zhanfeng², WANG Runsheng³

(1 School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2 Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;

3 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: As a spatial information analysis technology, GIS has been applied to petroleum industry widely, and digital oil - field has been a main solution for current oil - field construction, especially for the issues of data redundancy storage and sharing during the construction of oil field. Aiming at the problems of large- volume data storage and difficulty to share in Daqing Oil Field exploration and exploitation, this paper firstly analyzes the existing spatial and non - spatial data sharing problems that face the oil - field exploration, exploitation and construction, and then analyzes the sharing environment of spatial and non - spatial oil - field data based on sharing platform, finally presents the oil - field data management and sharing solution based on the ArcGIS platform.

Key words: digital oil - field; ArcGIS; data sharing; sharing platform