

南方复合地貌区 DEM 内插算法的对比研究

张笑^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 段淼然^{1,2}, 薛梦姣^{1,2}, 陈瑞芳^{1,2}

(1. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023; 2. 南京大学地理信息科学系, 南京 210023)

摘要: 数字高程模型是数字地形分析的重要数据基础, 在土壤、水文、地貌、生态环境、地质灾害、农业等领域均有广泛应用。插值生成的 DEM 精度与插值算法本身特性、插值区域地貌类型都密切相关, 研究插值算法对不同地貌类型的拟合精度差异, 对提高 DEM 插值精度具有重要意义。以平原丘陵兼有、水网密集分布的南方复合地貌区为研究区, 对 ANUDEM, IDW, Kriging, Spline, NNI, TIN 六种插值算法生成的 DEM 分别从总体、丘陵岗、平原 3 方面进行误差评价, 结果表明: 在丘陵岗地区, ANUDEM 精度最高, 对地形因子拟合程度最为准确; 在平原地区, ANUDEM, TIN 精度较高, 能准确刻画水网等细节信息; 总体而言, ANUDEM 插值生成的 DEM 更能够精确地模拟南方复合地貌区的真实地形。

关键词: 数字高程模型 (DEM); 空间内插; 南方复合地貌; 精度评价

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0106-07

Comparative Study of Different DEM Interpolation Algorithms in the Southern Complex Geomorphologic Zone

ZHANG Xiao^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, DUAN Miaoran^{1,2}, XUE Mengjiao^{1,2}, CHEN Ruifang^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,

Nanjing 210023, China; 2. Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Digital elevation model (DEM) is the basic data of digital terrain analysis and plays the key role in the soil sciences, hydrology, geomorphology, environmental science, geologic hazard, agriculture and so on. DEM accuracy is closely related to the characteristics of interpolation algorithms and types of landform, therefore, research on the fitting precision with interpolation methods on different landforms is important for the improvement of the DEM interpolation accuracy. Based on six interpolation methods including ANUDEM, IDW, Kriging, Spline, NNI and TIN, we chose southern complex geomorphologic zone as study area to contrast the accuracy of the interpolation surface and reticulation water network. The results showed that DEM interpolated by ANUDEM was much more precise than the others and reflected the terrain factors correctly in the hilly areas. Both ANUDEM and TIN performed well and could extract water network information in the plains. This study contributes to the obtaining of high-accurate DEM in southern complex geomorphologic zones.

Keywords: digital elevation model; interpolation algorithms; southern complex geomorphology; accuracy assessment

数字高程模型是地形曲面的数字化表达^[1], 是数字地形分析的重要数据基础, 在土壤、水文、地貌、生态环境、地质灾害、农业等领域均有广泛应用^[2]。尽管直接获取 DEM 的方法日趋增多, 但通过空间内插生成 DEM 的方法仍是主要的技术手段, 其成本低廉, 准确度高, 是迄今为止最成熟和可行的方法^[3]。

插值生成的 DEM 精度与插值算法本身特性、插

值区域地貌类型都密切相关, 尤其在采样点稀疏的情况下, 针对不同的地貌类型各插值算法生成的 DEM 也不尽相同, 故研究插值算法对不同地貌类型的拟合精度差异, 提高 DEM 插值精度具有重要意义。越来越多学者在此方面进行研究: Chaplot 等^[4] 研究插值算法在不同采样密度、空间结构、变异系数、各异性条件下对 DEM 精度的影响; 张锦明^[5] 针对不同地貌研究

DEM 插值参数的“优选”问题,建立地貌类型模糊隶属度函数模型等;Yang 等^[6]以黄土高原为例,通过校正地形源数据并优化算法参数的 ANUDEM 方法,提出水文地貌关系正确 DEM 的构建方法;胡海等^[7]对插值方法选择进行理论分析,分析了计算稳定性问题和高程同构特性;韩富江等^[8]揭示不同内插方法对可视性分析结果的影响规律和可视性分析对内插方法的敏感程度;宋向阳等^[9]探讨了不同插值方法下对不同耕作措施下微地表高精度 DEM 的建立方法。

上述研究集中在对地形复杂区的讨论,但对于地势低平、采样点少的复合地貌区的研究十分缺乏。本文以平原丘陵兼有、水网密集分布的南方复合地貌区为研究区,对 6 种插值算法生成的 DEM 分别从总体、丘陵岗、平原 3 个方面进行误差评价,其中丘陵岗地区着重地形因子(坡度、坡向)的表达,平原地区着重河流提取,旨在探索适合最佳的插值算法。

1 研究区概况与数据来源

本文研究区为常州金坛市,地处江苏省南部,位于北纬 31°33′42″—31°53′22″,东经 119°17′45″—119°44′59″,境内总体海拔高度为 0~300 m,河网交织。地貌属平原向丘陵过渡型,境内地势西北高,东南低。西部为丘陵地区,属宁镇山脉东缘的茅山山脉的一部分;东部为地势低平的平原,是太湖平原的一部分。平原与丘陵兼得的地貌条件,有利于进行空间插值方法对南方复合地貌区生产 DEM 的对比研究。

在研究区中选取 8 km×8 km 的典型试验区 1,2,试验区 1 为丘陵岗地区,地形起伏,等高线相对密集;试验区 2 为平原地区,地形平坦,河网密布,等高线稀疏。

本文以一系列离散高程点数据作为空间插值的基础数据。这些高程点全面覆盖整个金坛市,一部分为均匀分布的野外实际测量高程点,另一部分为通过 1:50 000 的地形图数字化采集间隔为 10 m 的等高线数据,将其抽稀并转化成离散点数据。抽稀以插值分辨率的 25 m 为阈值,保证等高线经过的每个格网单元至少有 1 个采样点。由于西部地形较东部复杂,等高线密集,故采样点个数西部较东部多。

进行精度评价的数据为 465 个实际测量高程点(试验区 1,试验区 2 内分别有 56,47 个)和金坛市 5 m×5 m 的 DEM 数据。

2 研究方法

本文主要是基于离散点数据,通过不同插值方法对不同地貌区生成 DEM,并评价其精度差异和误差

空间分布的过程。

2.1 空间插值方法

选择的插值方法有 ANUDEM 算法、反距离权重插值(IDW)、克里金插值(Kriging)、样条函数插值(Spline)、自然邻点插值(NNI)和 TIN。根据 1:50 000 数字高程模型生产技术规程,插值后 DEM 的分辨率设定为 25 m。

IDW 利用邻近已知点的数值进行加权运算,所需的权重根据距离远近来确定,离插值点越近的样本点赋予的权重越大^[10];Kriging 以协方差函数和变差函数来确定高程变量随空间距离而变化的规律,以距离为自变量的变差函数,计算相邻高程值关系权值,进而获得空间任意点或块最优的无偏估计值^[11];样条函数是使用函数逼近曲面的一种方法^[12],通过建立一个通过控制点并使所有点坡度变化最小的平滑曲面,即利用最小化表面总曲率的数学函数来估计值;自然邻点插值法是基于泰森多边形的插值方法,将泰森多边形的影响面积比率作为权重的影响因子;TIN 通过多层高程信息构建 TIN(不规则三角网),再将 TIN 插值得到规则网格的 DEM^[13]。

ANUDEM 为 20 世纪 80 年代 Hutchinson^[14]教授提出的 DEM 插值算法,是一种充分考虑地貌特征的插值算法,通过施加约束条件,保持地形结构连续,准确提取山脊、山谷等地貌要素,构建完整的水文模型算法主要包括 4 个方面:插值方法、数据平滑、地形强化和局部适应性处理^[15],采用嵌套式多分辨率迭代计算方法,引入一阶偏导数,对薄板样条插值法中糙度罚函数进行合理修改,并嵌入地形强化算法,使拟合的 DEM 能够还原真实的地形突变^[14,16]。ANUDEM 建立水文地貌关系正确的 DEM,真实反映地形起伏,适合高分辨率及低分辨率 DEM 生成^[17-18]。

2.2 精度评价

主要采用精度评价指标和误差地图的方法,对不同插值方法的误差分别从数值大小和可视化比较的方面进行定性和定量化描述。精度评价指标:通过比较用于精度评价的实际测量高程点与插值结果在同一位置的高程差异来反映误差大小。选择平均误差(ME)、均方差(RMSE)、拟合优越度(R^2)^[19]等统计两者间的误差,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - z_i)^2} \quad (1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - z_i| \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{z})^2} \quad (3)$$

式中: Z_i ——采样点 i 的实际高程; z_i ——采样点 i 的高程估算值; \bar{z} ——实际高程值的均值; n ——采样点数。

误差地图:通过在区域内叠加误差值来描述误差的可视化方法。将金坛市 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的 DEM 重采样成 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 与插值 DEM 相减, 得到误差地图。同时配合分层设色的方法, 通过颜色的区别可直观反映误差的空间分布状况。

同时, 不同地貌类型的精度评价有不同的侧重点, 除了对研究区高程的拟合误差进行评价外, 在丘陵岗地区对坡度、坡向等地形因子与真实地貌进行对比, 在平原地区对河流等地面要素提取与地表数据进行对比。

3 结果与分析

3.1 总体特征

利用 ANUDEM, IDW, Kriging, Spline, NNI 和 TIN 六种插值方法, 分别对研究数据进行空间插值, 所得结果见图 1。6 种方法生成的 DEM 显示效果良好, 要素表达完整, 西部丘陵起伏、山体走向和东部地区平坦地形、密集河网均清晰可见。其中: ANUDEM, Spline 在细节表现上更强, 能够反映细微地形变化, 水网表达更完整; 而 Kriging, IDW 插值更为光滑, 大量细微地形被忽略。

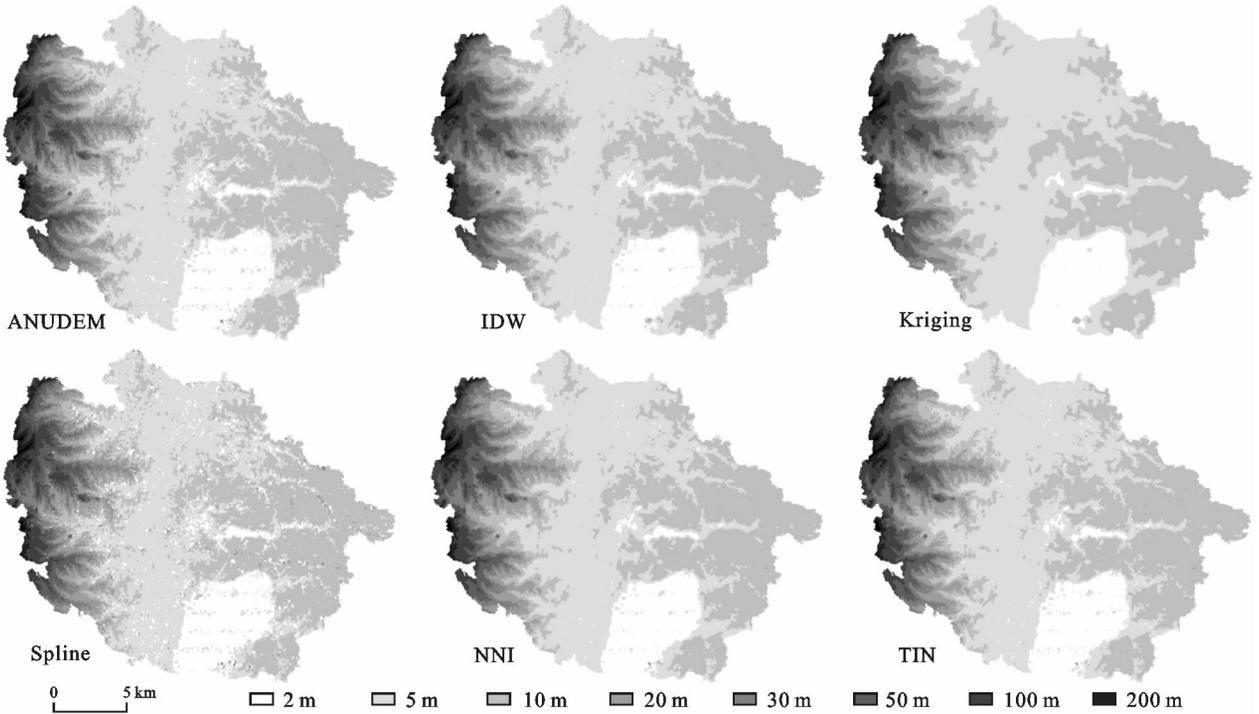


图 1 不同插值方法生成的 DEM

通过将不同插值方法所得高程值与实际高程值相比较, 结合精度评价指标, 得到不同内插方法结果的误差总体特征和精度指标(表 1)以及误差频数分布图(图 2), 可分析不同插值方法在南方复合地貌区的整体插值表现。

整体来看, 6 种插值方法的误差值主要集中在 $-2 \sim 2\text{ m}$, 占整体的 70% 以上, 基本符合误差值离

零值距离越远, 数量越少的趋势。误差平均值均为 $-0.15 \sim 0.15\text{ m}$, 拟合优越度均在 99% 以上, 除 Kriging 插值法的中误差略大于 4 m 外, 其余插值方法的中误差均小于 4 m 。研究区域地势低平, 高程变化不大, 各种插值方法均表现良好, 误差点主要集中在西部地区的山脊、沟谷等地貌单元以及区域边缘等数据稀少单元。

表 1 不同内插方法结果的精度评价

内插方法	平均值/m	最大值/m	最小值/m	平均误差/m	中误差/m	拟合优越度
ANUDEM	-0.0178	11.0298	-14.8098	1.2541	2.4011	0.9966
IDW	-0.1011	19.1448	-20.5915	1.5618	3.3472	0.9937
Kriging	-0.0747	25.1335	-29.4290	2.1181	4.1918	0.9900
Spline	0.0717	16.6160	-15.7000	1.3991	2.6070	0.9960
NNI	-0.138	11.7869	-16.1532	1.3195	2.5949	0.9962
TIN	-0.0818	11.0237	-18.9173	1.2971	2.5279	0.9964

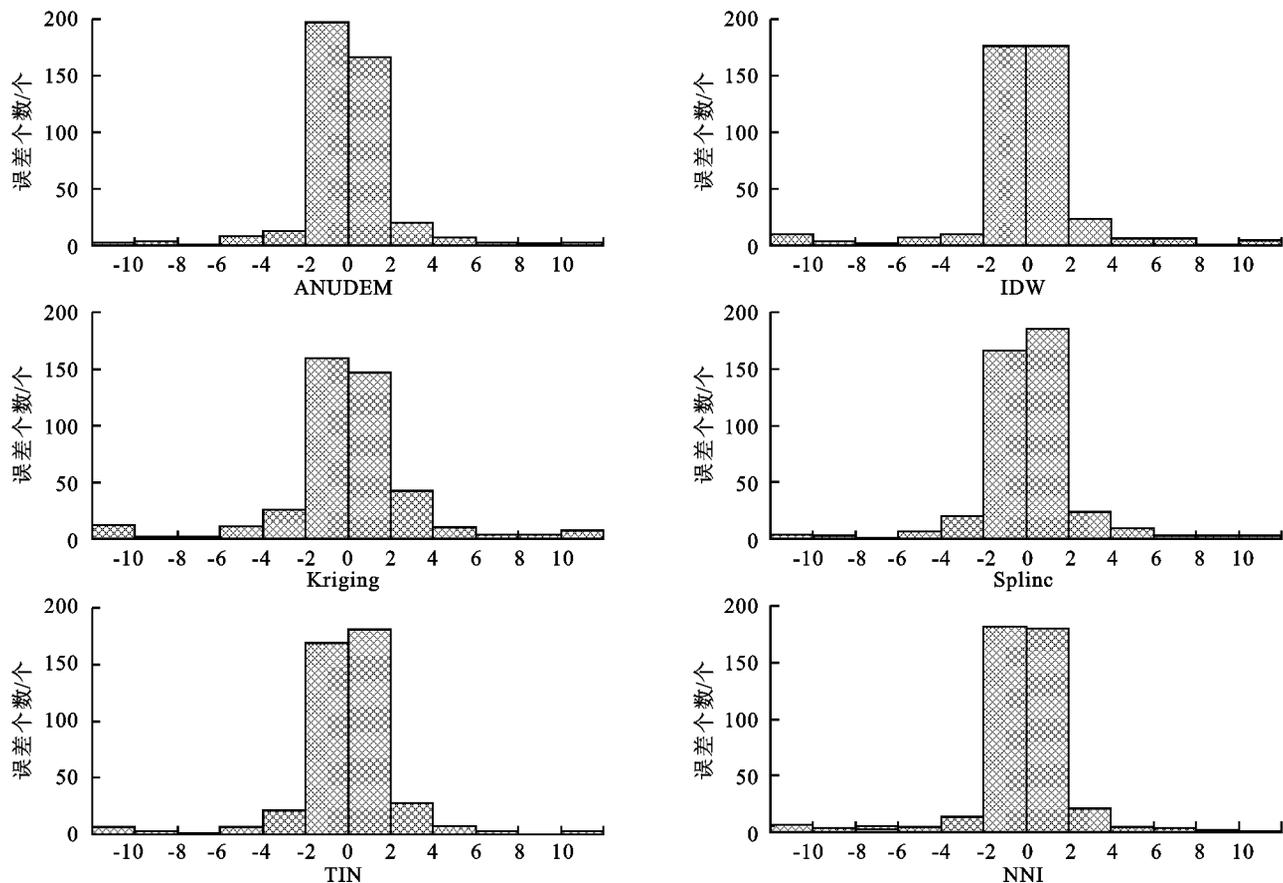


图 2 误差频数分布

其中, ANUDEM 插值法中各项误差指标均最小,拟合优越度最优,高程误差点数最少,说明 ANUDEM 的插值精度更高,相比于其他插值方法更适合南方复合地貌区;Spline, NNI, TIN 的拟合优越度均相对较高(>99.6%),误差值主要集中在-2~2 m 段,分别占总体的 81.95%,84.63%,81.79%,平均误差和中误差数值接近,远低于国家标准,插值结果较优;而 IDW 和 Kriging 与其他插值方法相比插值精度略低,拟合优越度均低于 99.5%,最大值与最小值跨度较大,平均误差和中误差较大, Kriging 中 28.17%的误差值大于 2 m 或小于-2 m,对连续起伏的地表的表现力不足。

3.2 丘陵岗地区

DEM 重点在于对地形地貌的真实表达,插值结果对地貌特征的还原程度十分关键。金坛西部有低

山丘陵、黄土缓岗等地貌类型,是由连绵不断的低矮山丘组成的地形,海拔在 300 m 以下,起伏不大,顶部浑圆,长期受风化侵蚀作用较为破碎。选择试验区 1 作为试验区,以此研究 6 种不同插值算法对丘陵岗地区拟合在高程、坡度、坡向等地形因子间差异。

3.2.1 高程误差 将研究区 1 内的 56 个高程控制点数据与插值结果相比对,得到丘陵岗区插值结果的精度评价(表 2)。在该地区,由于地形变化相对较大,各插值算法的中误差较总体偏大,精度与总体相比偏差,但 6 种方法中误差均小于 7 m,满足国家标准对 1:50 000 数字高程模型的生产精度要求。ANUDEM, TIN 的拟合优越度相近,分别为 99.7%, 99.68%,拟合精度较高,其中 ANUDEM 的中误差更小,故精度最好;IDW, Spline, NNI 拟合表现较为平均;而 Kriging 中误差达到 6.38 m,误差波动大。

表 2 丘陵岗地区不同内插方法结果的精度评价

内插方法	平均值/m	最大值/m	最小值/m	平均误差/m	中误差/m	拟合优越度
ANUDEM	-0.2270	7.2580	-14.8098	1.9345	3.134515	0.997
IDW	-0.9638	7.1312	-20.2218	2.8604	4.92118	0.9952
Kriging	-1.4071	10.0488	-29.4290	3.9249	6.382118	0.993
Spline	-0.0355	16.6160	-15.7000	2.3134	4.024108	0.9948
NNI	-0.6753	5.5544	-16.1532	2.1210	3.509086	0.9967
TIN	-0.7704	4.9057	-12.9990	2.1427	3.517652	0.9968

将 6 种插值后的 DEM 与实际 DEM 相减,得到能直观反映误差空间分布规律的误差地图(图 3)。误差主要集中在山脊、山谷、坡面等地形起伏较大区域,其中,高程在山脊、山体顶部均有不同程度削减,在山谷和山脚边大面积平坦地区则有明显抬高的情况。这种现象在西部茅山山脉附近表现尤为明显,其东北—西南向山脊被降低 6~25 m。

具体来说,ANUDEM, NNI, TIN 的插值结果精度较好,区域内误差值控制在合理范围之内,主要误差表现为降高升低,即在山脊、山顶等高值处的估计值偏低,在沟谷、谷间平地等低值处的估计值偏高,其中 NNI 在拉高低值方面表现更明显,而 ANUDEM 误差范围小,误差值小,对整体地形降高升低的作用

最弱,在各算法中精度最优;Spline 法对山脊的海拔高度拟合较好,但对点密度要求过于严格,采样点疏密不同,差异极大,在等高线密集(即采样点多)的山体拟合效果较优,在等高线稀疏(即采样点少)的谷间平地拟合效果十分不理想,常出现异常的隆起或凹陷;IDW, Kriging 对地形变化大的山体区域有大幅度降低山顶、山脊高程和升高坡面、山谷高程的现象,且山脊处出现明显的平顶,其中 Kriging 的插值结果对沟谷有大面积抬升高程的情况。

相比较之下,ANUDEM 与原 DEM 的重合性最好,针对低山、破碎丘陵带、谷间平地不同地貌类型均有良好的效果,对丘陵岗地区插值具有更好的适应性。

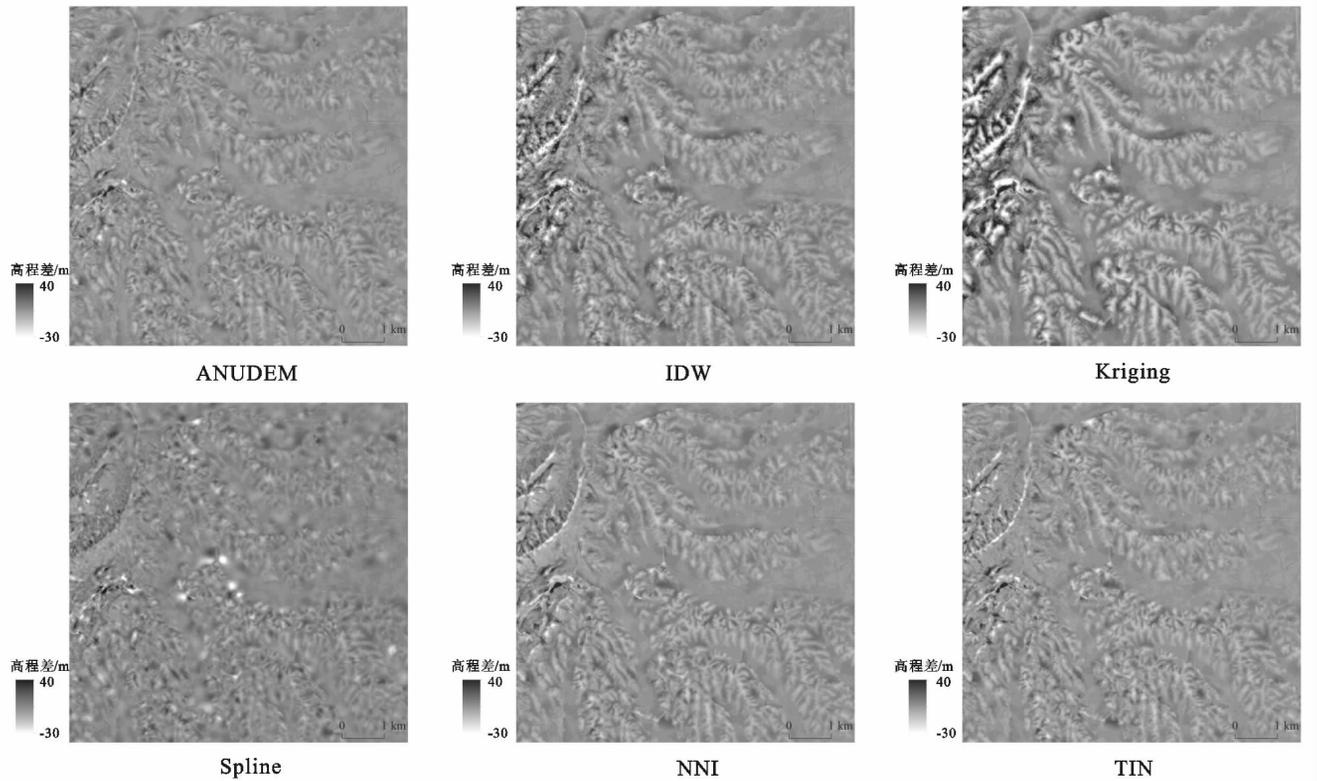


图 3 丘陵岗地区误差地图

3.2.2 坡度坡向误差 从插值结果中提取坡度信息,以 3 度为间隔,分为 18 个等级($0^{\circ}\sim 3^{\circ}$, $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$, ..., $>51^{\circ}$),统计各等级面积并绘制成折线图(图 4)。试验区地势起伏小,主要集中在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$,并且面积占比随坡度增加而减小。其中,以第 2 等级($3^{\circ}\sim 6^{\circ}$)为转折点, $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 时各算法面积占比均大于原始 DEM,在 6° 之后,各算法均小于原始 DEM。这说明在各算法降高升低的趋势下,对地形有显著的平坦化现象,导致高坡度的区域被平滑后转变成低坡度区域,尤其是破碎丘陵带的大面积缓坡坡度减小,部分山包/低矮山丘变成平地。Spline 对坡度的拟合性最好;ANUDEM 拟合性较好,且能真实刻画细微地形变

化;TIN, IDW 对坡度拟合程度一般,有轻微的平坦化现象;NNI, Kriging 对地形平坦化现象明显,对地形表达不利。

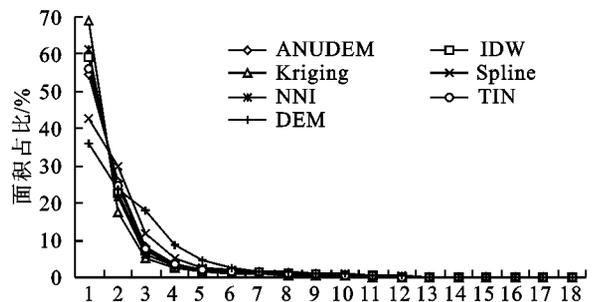


图 4 不同坡度级的面积比例

从插值结果生成的 DEM 中提取坡向信息,分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北、北 8 个朝向,统计各朝向面积并绘制成折线图(图 5)。6 种插值算法在东向坡(东北、东、东南)与西向坡(西南、西、西北)的差异较大,东向坡面积占比大于实际地形,西向坡则小于实际地形,且东向增加幅度略大于西向。这是由于 6 种算法均有不同程度平坦化地形的现象,导致高占比的东向向低占比的西向转移。spline 与原曲线最接近,对坡向的拟合程度最好,其次分别是 ANUDEM, TIN, IDW, 而 NNI, Kriging 与原曲线偏差较大,对坡向的拟合程度较差。

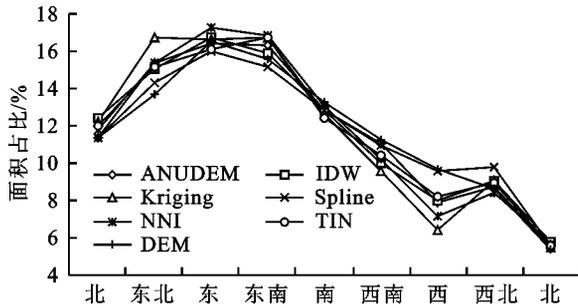


图 5 不同坡向的面积比例

详细观察 Spline 与地形因子拟合程度最高的

表 3 平原地区不同内插方法结果的精度评价

内插方法	平均值/m	最大值/m	最小值/m	平均误差/m	中误差/m	拟合优越度
ANUDEM	-0.0057	2.1457	-2.5624	0.6313	0.7792	0.7568
IDW	0.1027	3.0897	-2.7486	0.6448	0.9463	0.7048
Kriging	0.1514	3.8163	-2.6307	0.7401	1.1481	0.6402
Spline	-0.0281	3.1644	-4.0770	0.7337	1.1903	0.6595
NNI	0.0528	3.0849	-2.3379	0.6262	0.8205	0.7394
TIN	0.0311	3.1192	-2.8188	0.6172	0.8345	0.7359

将 6 种插值后的 DEM 与实际 DEM 相减,得到能直观反映误差空间分布规律的误差地图。各算法对平原地区的拟合误差不大,48%以上区域误差控制在 0.5 m 内,主要为大面积的鱼塘农田和钱资荡主体。由于采样点数量限制,对于平原地区的地物细节表现力不强,对于狭窄河道和道路信息被忽略,其误差主要表现为在湖泊(钱资荡)边缘、水网及少量鱼塘的高程上升,道路、小山包及少量农田等地区的高程下降。与精度指标评价结果相类似,ANUDEM, NNI, TIN 的误差范围较小,对河流、道路等地物的误差较小,能正确反映大面积的平坦地貌;IDW, Kriging 对细微地形变化不敏感,对水网、道路周边农田鱼塘的高程有明显的误差,其中 IDW 易受极值点影响,有明显的“牛眼”效应,而 Kriging 误差面积大,有明显平坦化现象;Spline 误差范围大,误差值大,在农田鱼塘区拟合出不存在的山地或洼地,真实还原度差。

原因,发现其对坡度较缓区域有异常的插值现象,导致出现不存在的丘陵山体,增加了坡度坡向面积占比,使平坦化现象减弱,并非真实准确地反映地表现状。ANUDEM 准确表现地形起伏,拟合程度较优,能更好地反映丘陵岗区的地形变化。

3.3 平原地区

金坛西部为平原地区,有低洼圩区和高亢平原等主要类型,海拔集中在 0~10 m,地势平坦,水网密布。选择含钱资荡及延生水网的试验区 2 作为试验区,以此研究 6 种不同插值算法对平原地区拟合在高程精度、河流提取方面的差异。

3.3.1 高程误差 将研究区 1 内的 47 个高程控制点数据与插值结果相比对,得到平原区插值结果的精度评价(表 3)。平原地区地形变化小,误差较总体偏小,拟合程度比丘陵岗地区好。各算法的中误差均小于 4 m,满足国家标准对 1:50 000 数字高程模型的生产精度要求。ANUDEM 的中误差最小,拟合优越度最大,精度最高,对平原地形表达更精确;NNI, TIN 的各项指标值相近,精度相近;而 IDW, Kriging, Spline 的误差值波动较大,后两者中误差均大于 1,精度欠佳。

3.3.2 河流提取 南方平原地区河网密集,通过 DEM 能获得较为完备的河道信息也是各算法对平原地区适应程度的重要条件之一。根据湖泊水位与陆地的高度差异,通过反复试验,并与 Google Earth 影像数据的河岸边缘相套合,最后选择 2.14 m 作为划分河流和陆地的阈值,提取实际 DEM 与插值后 DEM 中小于阈值的栅格单元,得到实际河流与插值后的提取河流。

各算法能将大面积的湖泊提取出来,但湖泊边缘有缺失,导致不同程度的面积缩减。对钱资荡延生水网的提取能力较弱,大多数狭窄河道无法准确识别。如表 4 所示,ANUDEM, Spline 正确提取出的河流面积最大,分别为 5.717, 5.865 km²,能正确反映湖泊面积及部分狭窄河网,但 Spline 提取的错误面积约为 ANUDEM 的两倍,精度不够;NNI, TIN 正确提取的面积其次,错误面积小,分别为 0.480 6, 0.656 5 km²,且

TIN 能提取更为详细的河网; IDW, Kriging 仅能提取钱资荡的主体部分, 面积减少量大, 且大量忽略狭窄河道的信息。ANUDEM 与 TIN 均能保证在较完整地提取河道, 前者可提取出大面积的正确河道, 后者对河网细节刻画更清晰。

表 4 不同内插方法提取的河流面积 km²

项目	ANUDEM	IDW	Kriging	Spline	NNI	TIN
提取面积	6.8310	5.1201	3.5081	7.8772	5.4740	5.8972
正确面积	5.7170	4.6836	3.3510	5.8650	4.9934	5.2407
错误面积	1.1140	0.4365	0.1571	2.0122	0.4806	0.6565

4 结论

(1) 6 种插值方法对研究区有良好的插值效果, 在各地貌类型区均符合国家标准对 1:50 000 数字高程模型的生产精度要求。其中丘陵岗地区由于地形复杂, 误差较平原地区大, 但总体中误差控制在 7 m 内。

(2) 在丘陵岗地区, ANUDEM 精度最高, 对地形因子拟合程度最为准确, 针对低山、破碎丘陵带、谷间平地不同地貌类型拟合效果良好, 具有更好的适应性; Spline 对采样点密集区域拟合效果好, 对采样点稀疏区域准确度差; IDW, Kriging 有明显的平坦化现象。

(3) 在平原地区, ANUDEM, TIN 精度较高, 能正确反映大面积的平坦地貌, 并准确刻画地物细节信息, 更适合对水网密集的平原地区进行插值; Spline 真实还原度较差; IDW, Kriging 对细微地形变化不敏感。

综合来看, ANUDEM 在对丘陵岗地区、平原地区均适应性良好, 更适合对南方复合地貌区进行整体插值。

参考文献:

[1] 汤国安, 李发源, 刘学军. 数字高程模型教程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[2] 杨昕, 汤国安, 刘学军, 等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009(9): 1058-1070.

[3] 谭衢霖, 徐潇, 王浩宇, 等. 不同地貌类型区 DEM 空间内插算法精度评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 139-149.

[4] Chaplot V, Frédéric Darboux, Hocine Bourenane, et al. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform

types and data density[J]. *Geomorphology*, 2006, 77(1/2): 126-141.

- [5] 张锦明. DEM 插值算法适应性研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2012.
- [6] Yang Q K, McVicar T R, Niel T G V, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2007, 9(3): 235-246.
- [7] 胡海, 游涟, 胡鹏, 等. 数字高程模型内插方法的分析和选择[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(1): 82-85.
- [8] 韩富江, 刘学军, 潘胜玲. DEM 内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(1): 31-35.
- [9] 宋向阳, 吴发启. 几种插值方法在微 DEM 构建中的应用[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 45-50.
- [10] 曹晓敏, 刘志红, 张晓萍. 黄土高原中游降雨量的空间插值方法研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 217-221.
- [11] 包世泰, 廖衍旋, 胡月明, 等. 基于 Kriging 的地形高程插值[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 28-32.
- [12] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265.
- [13] 杨勤科, McVicar T R, Niel T G V, 等. ANUDEM 和 TIN 两种建立 DEM 方法的对比研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(6): 84-88.
- [14] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 106(3/4): 211-232.
- [15] 杨勤科, McVicar T R, 李领涛, 等. ANUDEM: 专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 36-41.
- [16] Hutchinson M F. ANUDEM version 5.3, user guide [Z]. Canberra: Fenner School of Environment and Society, Australian National University, 2011.
- [17] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 1009-1014.
- [18] 杨勤科, 师维娟, McVicar T R, 等. 水文地貌关系正确 DEM 的建立方法[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(4): 1-6.
- [19] 兰玉芳, 徐霞, 胡英敏. 等高线内插 DEM 算法的质量评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 25-28.