

文章编号:1671-8860(2009)03-0352-06

文献标志码:A

数字高程模型生成中的高程序同构

胡 鹏^{1,2} 白轶多¹ 胡 海¹

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,武汉市珞喻路129号,430079)

摘要:通过揭示三维地面严密的高程有序性,揭示并定义了数字高程模型(DEM)生成中的高程序同构特性。在此基础上论证了DEM的高程序同构的必需条件——内插生成过程中与地面的拓扑对应和变换的“高处仍高,低处仍低”的数量特性,并据此论证了在DEM生成中三种主要内插方法的高程序同构特性。

关键词:数字高程模型;拓扑对应;高程序同构;线性内插;三角形线性内插;双一次拟线性内插

中图法分类号:P208; P283.1

象。

在DEM建立过程中,所用方法、概念要能提供客观地形这样一种几何性的保持,文献[1]定义它为“DEM高保真”问题。从经典的数学概念看,所谓“DEM高保真”本质上是DEM与其地面原像间的高程序同构问题。

1.2 DEM生成的高程序同构是个极其重要的理论问题

序集A到序集A'上的映射 $p:A\rightarrow A'$,若当 $a < b$,则必有 $p(a) < p(b)$,则称为序集的同态或序同态,且当 p 是一一对应,而 p^{-1} 也是A'到A上的同态时, p 称为同构或序同构^[2]。DEM作为地面高程的数字模型:①理论上,DEM间距可为任意值,包括一个无限小正值,因而作为一个由地面原像到DEM的映射 p 而言,显然, p 是高程序同态,且是一一对应的。②DEM上的高程序一定要与地面一样,否则,DEM上水文之类的各种分析没有确定的真实性,也即 p^{-1} 一定是DEM到地面的高程序同态,因此, p 必须是一个高程序同构。

2 采用地图上等值线数据建立的DEM能否与地面序同构

2.1 地形图的高程序同构

地图作为地理信息的图形符号模型,也存在

是否高程序同构的问题。概念上,只要地图上给出了全面的高程数据,高程序关系是实地或实形上无数次的各种测量、绘图过程所检验或者经验来保证的;一旦有误,必须返工,以至人们形成常识:该尺度的该地形图上的高程序是与实地一致的。

2.2 拓扑对应和“高处仍高,低处仍低”的变换特性是地面映像保持原高程序的必需条件

显然,倘若地面映像(地图、DEM等)理论上与地面原像不是一个拓扑对应关系,实际地面上任意两点的高程必定具有的有序关系在地面映像上不能比较,即使能比较,也不能得到可信有效的结果。

另外,倘若不能保证“高处仍高,低处仍低”的变换特性,原高程序即遭破坏,原地面严密的有序系统性在其地面映像中将不复存在。“高处仍高,低处仍低”的变换特性就是高程的上述序同态的语言表述。反过来,反变换若不是序同态,即若原像点A高于B,也即有两像点A'高于B',变回它们的对应原像A'⁻¹、B'⁻¹,低的B'⁻¹变成高于A'⁻¹了。由于变换为拓扑对应,反变换也具有一一对应特性,而原像A和A'⁻¹或B和B'⁻¹现已不同,与拓扑对应矛盾,故反变换必是序同态。这样,对于具体的DEM生成问题,通过拓扑变换的证实和高程序同态,高程序同构即可证。

对于地形图而言,与地面理论上既是一一对应,又是双向连续的拓扑变换,并且“高处仍高,低处仍低”的变换特性仍然存在。在地形图制作和使用过程中,在全区域或任一局部,它都作为一个基本规则制约着DEM生成的整个时空过程。

严格地讲,地图的高程数据和实际地面并不是一回事。讨论基于下列假设。

假设1 假设地图上的高程数据是完全确定和精确的(它甚至可能代表一个被设计的几何曲面),它采用等值线法来表示复杂的几何曲面,这时,讨论一个很好的逼真于此曲面的DEM是现实的,因为它用的完全是此曲面的数据。符合国家标准的该地形图产品本身表明,该比例尺下,用该图的确定模型表达该区确定地面上已无大碍。

以上用最广泛的地图模型说明了模型对于真实地面的高程序同构。而理论上,若A、B序同构,B、C序同构,则A、C也序同构。若依据地图数据制作的DEM与地图模型是高程序同构的,则自然可有此DEM与真实地面的高程序同构。

同样,某一比例尺测量得到的数据(包括高程)也假设是完全确定和精确的,并且很全面,则

它所反映的复杂机理的“心像地图”(即地面模型)也可类同于上述实际地图模型,其上生成的DEM也可类同讨论。

3 三种内插方法的高程序同构特性论证

所有通过内插方法生成的DEM都是实施局部的内插,而高程序同构是全局的本质特性要求,无数局部的内插如何最终成就产生的DEM这个全局特性,是重要、深刻的理论问题。

假设2 认为地面是定义在水平面上的一个单值连续曲面,并可视为由在各层次地形正、负结构线上连续的单调曲面片(坡面)拼接而成,其内部被认为没有(相对高程最大偏差不大于某一指定正数 ϵ_1)结构线和明显的坡度变更线。这时,坡面内无高程极值点和方向极值点,可以说坡面是单调的;各结构线上和全区其他地方有足够密度的已知点作为内插节点,在各内插节点上,地面高程和内插高程值相同。

3.1 三角形上线性内插方法的高程序同构特性

这时,可视地面由与其高程最大偏差不大于某一指定正数 ϵ_2 的若干三维三角形组合面来逼近。在这种设定下,每一上述单调曲面片由这些三角形及其边界垂直对应的三角地面所剖分。DEM生成的内插单元即相应为这些三维三角形在水平面上的投影,图1所示为其中一单元。

1) 三角形 $E_dF_dG_d$ 上,地面原像和线性内插像是一一对应且双向连续的。三角形线性插值公式可表示为^[2]:

$$Z(X, Y) = Z_E \lambda_E(X, Y) + Z_F \lambda_F(X, Y) + Z_G \lambda_G(X, Y) \quad (1)$$

$$0 \leq \lambda_E, \lambda_F, \lambda_G \leq 1, \text{且 } \lambda_E + \lambda_F + \lambda_G = 1 \quad (2)$$

其中, Z_E, Z_F, Z_G 为 E, F, G 上的高程 Z 坐标; $\lambda_E, \lambda_F, \lambda_G$ 为面积坐标或重心坐标^[3,4](见图1(b))。

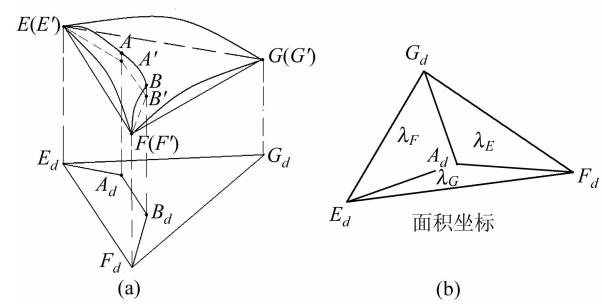


图1 三角形上线性内插中高程序同构

Fig. 1 Elevation Order Isomorphism During Linear Interpolating on Triangle

当代入3点X、Y及高程坐标后,只要三角形 $E_dF_dG_d$ 面积不为0,式(1)惟一可解。也即三角形 $E_dF_dG_d$ 内任一点 A_d 均有原像A及线性内插像 A' ,它们是一一对应且双向连续的;而在三角形 $E_dF_dG_d$ 上,如 E_dF_d 上任一点 A_d ,必有原像A及惟一线性内插像 A' ,且 $\lambda_G=0$,并设想在其相邻三角形 $E_dF_dH_d$ 中的 E_dF_d 上也有原像A及惟一线性内插像 A'' ,且 $\lambda_H=0$ 。由式(1)知, A' 和 A'' 的Z坐标相同,是一个点,且与邻域(在两个邻接的空间三角形上)也是连续的。这样,三角形 $E_dF_dG_d$ 上线性内插的特性可通过三角形结构一直拓展到区域边界。

2) 三角形 $E_dF_dG_d$ 上,地面原像和线性内插像符合“高处仍高,低处仍低”的特性。

由于所谓曲面单调是指过其上高点A、低点B作一垂直切面,则有AB弧线段上点的水平投影离A水平投影 A_d 越近,该点越高;越远,则越低。

如图1(a)所示,不失一般性,设单调三角曲面 EFG 中, E_d 最高, F 最低。有任意高点A、低点B,即 $Z_A > Z_B$,则过 EA 、 AB 、 BF 各作垂直切面,交三角形 EFG 于 $E'A'$ 、 $A'B'$ 、 $B'F'$,交水平面于 EA 、 AB 、 BF 。这时,由于三角曲面单调,曲面上的线段 EA 、 AB 、 BF 为一单调曲线,且 $Z_E > Z_A > Z_B > Z_F$ 。也即有 $B_dF_d + B_dA_d + A_dE_d \geq B_dA_d + A_dE_d \geq A_dE_d \geq E_dE_d$,故在同是单调的三角形 $E'F'G'$ 中, $Z_E = Z_{E'} \geq Z_{A'} \geq Z_{B'} \geq Z_{F'} = Z_F$ 。同理,有 $Z_{A'} > Z_{B'}$,也即有 $Z_A > Z_B$ 。

上述证明中假设无碍一般性,即在一个三角形上,线性内插保证了“高处仍高,低处仍低”的高保真特性。由图2所示,也可从曲面函数分析看此问题:在一切单调的曲面单元及其相应的空间三角形或平面间,它们在该单调区域间的函数泰勒级数展开一阶,一次(线性)项相同,二次以上项微小,且其总和完全影响不了线性项差值的符号。也即所有 $Z_A - Z_{A'}$ 、 $Z_B - Z_{B'}$ 差的绝对值相比较于 $A - B$ 的差值绝对值是个高阶小量,它们的和不足以影响到 $A - B$ 的差值的符号,即

$$\begin{aligned} Z_{A'} - Z_{B'} &= Z_A - (Z_A - Z_{A'}) - Z_B + \\ (Z_B - Z_{B'}) &= Z_A - Z_B - \\ &[(Z_A - Z_{A'}) - (Z_B - Z_{B'})] \end{aligned} \quad (3)$$

由于中括号内的绝对值在各种情况下都小于 $|Z_A - Z_B|$,故 $Z_{A'} - Z_{B'}$ 与 $Z_A - Z_B$ 同正、负号,这才在该区域上呈现单调特性。而且如图2所示,只要曲面单调,上述结论在A及B处于不同的平面(或折线段)内也如此。

由于一个平面多边形可以分解为无缝无叠的三角形剖分,在各三角形内和边界上,对应的单调坡面都具有一一对应且双向连续的特性,因此,一个单调面内的三角形上线性内插中都具有“高处仍高,低处仍低”的特性。

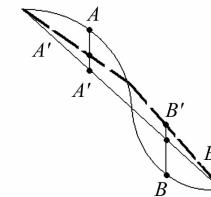


图2 区间上单调曲线与不同线段斜率之高程序不变关系

Fig. 2 Elevation Order Invariability between Monotonic Curves and Slopes of Different Lines

3) 若A、B不在一个单调坡面内,而在两相邻单调坡面内,且两坡面最高点在两相邻坡面的拼合线上,地面原像和线性内插像符合“高处仍高,低处仍低”。若A点高,B点低,这时,在两相邻坡面的拼合线上总可取一点C,使 $Z_A \geq Z_C > Z_B$ 。过AC及CB作垂直切面,由步骤2)可知,这时仍有 $Z_{A'} \geq Z_C > Z_{B'}$ 。

4) 在同一个山头内,A、B不在一个单调坡面,不管相邻与否,总可通过步骤3)有序地辗转相邻,当有 $Z_A > Z_B$ 时,有 $Z_{A'} > Z_{B'}$ 。

5) A、B不在一个山头内,总可在B点所在的山头找到一点 A_1 ,使 $Z_{A_1} = Z_A$,这时按步骤4)必有 $Z_{A'_1} > Z_{B'}$ 。

由于A及 A' 的关系和 A_1 与 A'_1 的关系均非特定,而是泛指一切单调的曲面单元及其相应空间的三角形或平面,故可使 A_1 与 A'_1 和A及 A' 的状况一样,即令 $Z_{A'_1} = Z_{A'}$,也即可有 $Z_{A'} > Z_{B'}$ 。也可从式(3)和图2看此问题:在一切单调的曲面单元及其相应的空间三角形或平面间,所有 $Z_A - Z_{A'}$ 、 $Z_B - Z_{B'}$ 差的绝对值相较于 $A - B$ 的差值绝对值是个高阶小量,它们的和不会影响到 $A - B$ 的差值的符号。

在上述论证中,地面上的所有点在三角形上线性内插中有且只有惟一像是特别重要的,并且在所有的(三维空间)三角形内不能有结构线是必要条件。任何结构线必须在边上,一旦内有结构线,坡面内就不存在曲面单调条件,而空间三角形却总是单调的,上述论证中的推理前提即被破坏,论证不成立。为此,必须无遗漏地在所有算得上结构线的地方较高密度地布置已知点,以满足本特性要求。由此可见,三角形上线性内插方法只

有在给出的数据点所形成的三角剖分在“所有的(三维空间)三角形内不能有结构线”的条件下才能实现高程序同构,这是一种被动的高程序同构方法。

3.2 双一次拟线性内插中高程序同构特性

1) 如图 3 所示, 定义在四边形 00011110 上的双一次拟线性插值公式为:

$$Z(X, Y) = a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{11}XY \quad (4)$$

其中, $a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{11}$ 可通过代入四边形四顶点 00、01、10、11 的已知 X, Y, Z 值, 解线性方程组得到:

$$Z_{ij} = \sum a_{ij} X_{ij}^i Y_{ij}^j, \quad i, j = 0, 1 \quad (5)$$

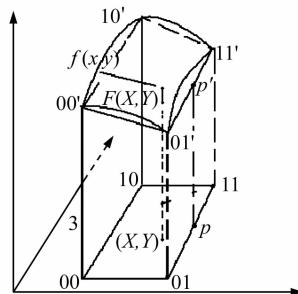


图 3 双一次拟线性内插示意图

Fig. 3 Double Quasi-linearity Interpolation

2) 矩形域上, 地面原像和双一次拟线性内插像是一一对应且双向连续的。无碍一般性, 设矩形边平行于坐标轴, 这时, 式(4)为当 p 点在 0111 线段上时, $01'11'$ 和 0111 的变换关系式:

$$Z(X, Y) = (a_{00} + a_{10}X) + (a_{01} + a_{11}X)Y \quad (6)$$

也即由 01 及 $01'$ 以及 11 及 $11'$ 两对点的关系惟一决定 0111 上各点的变换像, 与 $00, 10$ 与 $00', 10'$ 的变换无关。也就是说, 当 p 点在矩形域分划的左、右单元移动时, 在单元边界上的像是惟一的, 而式(5)又显然表明在单元内惟一。同样, 可推广到上下方向。这样, 在矩形域分划上, 地形表面和该矩形单元组合成的面相互间是一一对应且双向连续的; 而在非矩形域的四边形分划上, 式(5)的关系就不存在, 0111 线段上的 p 点将分别受到 $00, 10$ 和 $02, 12$ 及它们各自内插像间关系的影响, 一般在相邻两单元的内插像 p', p'' 不相同, 也即在相邻两四边形内插单元中有不同的内插像 p', p'' 。

3) 由于实际地形正、负结构线与极值点极少可能按矩形分划，并且单元内自然曲面的极值几乎不可能与四个角点(三维)坐标所确定的双一次曲面的极值总是一样，因此，本内插像不会总符合“高处仍高，低处仍低”的特性。因此，不管是矩形

或非矩形分划,单纯双一次拟线性内插并不能实现前述 DEM 的高程序同构。

3.3 线性内插方法生成 DEM 的高程序同构特性

线性内插是以数学上等值线法的点、线为基础数据生成,而对于自然图形的等高线、点,传统方法严密地实现线性内插有一定的困难。MADEM是一个运用地图代数实现等值线法数据线性内插的新方法^[1]。这时,已知特征点也可视为具有特定高程和形状的等高线(缩为一点),把地表曲面按一定比例垂直投影到水平面上,得到水平面上的拓扑对应地图,图上每一点的高程由该点到其相邻两等高线的水平最近距离之比例线性内插决定。这样,在两相邻等高线间等距离处可得到 $1/2$ 距等高线,同理,也可得到 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 、 \dots 、 $1/2^n$ 距等高线。这时,相邻等高线可视为足够密,实际差值已视为很小。把各 $1/2^n$ 距等高线的 Voronoi 区域的全部点赋予相应的高程值后,再停止,这时在两等高线的梯度方向上,除原等高线上的点外,其余点间并没有实质的斜率变化,故斜率变化率(二阶导数)为 0。整个过程实质是形成与地图上已知高程点、线完全相同的高程点、线集,并在其点、线间线性内插出足够密集的等高线簇。这是严密地实现线性内插而得到 DEM 的方法。实际地面上,每一个点的流线及整个流线全集体现了全区域上的高程逻辑^[6],它表现为地形图上过图上各点且垂直于等高线簇的流线投影。这时,区域上每一点的流线可视为由各空间曲线段组成,这些曲线段是以与相邻等高线相交的节点为端点的。任一点线性内插的结果都在其以同一对节点为端点的线段上,既不会高于高端点,也不会低于低端点,总处在其间。显然,地图是与地面拓扑对应的,线性内插像与地图是拓扑对应的。

图 4 显示了等高线、高程点间采用线性内插生成的 DEM^[3]，并对 DEM 上各网点进行分层设色以示高差的例图。等高线法在数学上严密地序分了全区域所有点的高程，而在线性内插过程中，原图上的高程点、等高线是始终不变的，并且其间点集的拓扑关系也保持不变。图中也很明显，若有点 A、B 高程差得较大，以致有已知点、线间隔，则内插出的 DEM 始终间隔，高程序列依旧，上述结论是显然的。主要问题是讨论当 A、B 高程差得较小，以至同在一对等高线间时，则依它们高程的高低，完全确定了它们离低等高线相对距离的远近，也决定了相应线性内插像的高低，显示为仍

然保持了原高程序列。其论证如下。

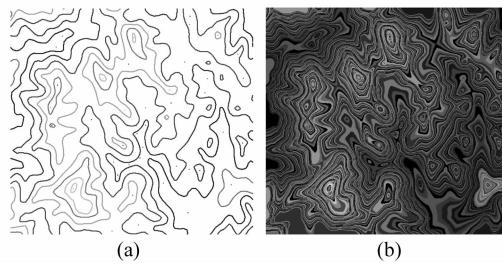


图4 地面概念模型上的等值线图及其
线性内插后的高程序同构的 DEM

Fig. 4 Contour Map on Ground Model and DEM of
Elevation Order Isomorphism after the Map Interpolated

1) 若 A, B 在一个坡面内, 且在一条流线上, 原像和线性内插像符合“高处仍高, 低处仍低”。这时, 沿一流线单元作垂直切面可得 XOZ 上的展开示意图, 如图 5 所示。图中, 它必然是单调的, 否则, 它一定要出现越过凸、凹极值点的过顶现象, 而这是自然流线绝不允许的。这时, 以流线与各等高线(首曲线)的交点和两端点组成的有序线性内插折线也必然是单调的, 即流线上 A 点高, B 点低, 则 $X_A < X_B$, 故必有相应折线上一一对应的像 A' 点高, B' 点低。即在同一流线及其各段上线性内插, 保证了“高处仍高, 低处仍低”的高程序同构特性。

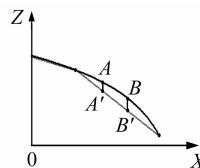


图5 流线上线性内插高程序同构示意图

Fig. 5 Elevation Order Isomorphism of Linear
Interpolation on Flown Line

2) A, B 邻近, 但不在一条流线上, 流线上下端点的高程值相同时, 原像和线性内插像符合“高处仍高, 低处仍低”。如图 6 所示, A, B 邻近, A 点高, B 点低, 即 $Z_A > Z_B$ 成立, 但不在一条流线上。这时, C, D 为两相邻包含 A, B 高程的已知等高线, 分别过 A, B 沿梯度最大方向作一垂直切面。图 6(a)为过等高线 D 的水平面俯视图, 垂直切面过 A, B 与 D_A, D_B 延长线、 C_A, C_B 延长线相交于 C_A, D_A, C_B, D_B ; 图 6(b)为过 B 的流线作的垂直剖面, 并沿流线的轴向展开为 XOZ 图; 图 6(c)为过 A 的流线作的垂直剖面, 并沿流线的轴向展开为 XOZ 图。图 6(a)上, D_A, D_B 分别为过 A, B 流线的垂直剖面与等高线 D 的交点, 由于 A, B 邻近, 且 $D_A D_B$ 和 $C_A C_B$ 是两个非常逼近等高线

D, C 的直线段, 故 $D_A D_B C_A$ 和 $C_A C_B D_B$ 是两个空间三角形, 其对应的两三角地面均由 C 到 D 的同向流线充满, 均是单调的曲面, 故总可以在 $C_A D_B$ 上找到一点 E , 使 $Z_A > Z_E > Z_B$ 。这时, 如前所述三角形上线性插值, 有 $Z_{A'} > Z_{E'} > Z_{B'}$; 而在两个空间三角形及其对应的两三角地面中, 线性插值恰有 $Z_{A'} = Z_{A''}, Z_{B'} = Z_{B''}$, 故有 $Z_{A'} > Z_{E'} > Z_B$ 。

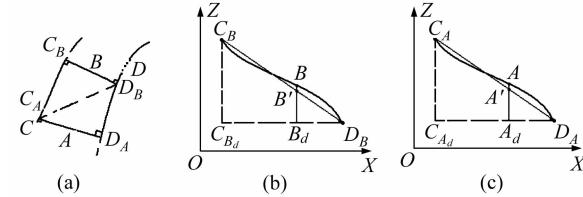


图6 同一坡元内序同构特性示意图

Fig. 6 Sketch Map of Order Isomorphism
on the Same Slope

类此, 可逐渐使 B 点外移 B_1, B_2, \dots , 也均保持上述特性。类同前述三角形上线性插值, 也可推论, 在不同的坡面上, 在同样两相邻等高线间的线性内插均保持了“高处仍高, 低处仍低”的特性。

3) 当 A, B 所在流线的上下端点高程值不同(也即在不同的等高线间)时, 若仍是 A 点高、 B 点低, 即 $Z_A > Z_B$ 成立, 这时, 由于线性变换特性, 各已知等高线(高程)上的点均作为节点, 内插值不变, 故各流线段上下端点的高程均保持不变, A 所在流线段下端点的高程必不小于 B 所在流线段上端点的高程成立, 因而必有 $Z_{A'} > Z_{B'}$ 成立。因此, 上述高程序同构特性在各实际高程地带内是成立的, 从而在带之间、带上, 也即在全部内插区均成立。

在上述论证中, 地面上的所有点在线性变换中有且只有惟一像是特别重要的。并且, 倘若能严格实现在流水线段上内插, 那么这种内插将不会超越任何地形结构线, 且这种内插将是主动型高程序同构的。

4 结语

以上在地图数据是完全正确、准确的条件下论证了 DEM 的高程序同构问题, 还必须顾及实际地图数据不可避免地具有随机误差。可以这样考虑: 一定尺度下允许的随机误差并未妨碍过地图的真理性, 包括高程序同构特性。那么, 在同样的随机误差允许度下, 上述讨论也同样适合实际地图数据上的 DEM。

无可置疑, 并非所有“地面的数字表达”均具

有高程序同构特性。本文揭示了 DEM 内插生成中除各点高程的近似性外,高程序同构是本质特性;否则,所有依据 DEM 进行的水文分析将没有确定的真实性,DEM 也不是科学的模型、产品。然而,该本质特性长期以来始终被忽视,并且地学上广泛的序现象也很少被严密地讨论。由上述分析可知,尽管 DEM 的生成有众多方法,但首先必须明确,只有通过具有高程序同构特性的技术方法生成的 DEM 才有明确有序的理论背景,才具有较广泛的实际意义。

参 考 文 献

[1] 胡鹏,杨传勇,吴艳兰,等.新数字高程模型:理论、方法、标准和应用[M].北京:测绘出版社,2007:56-58

[2] 日本数学会.数学百科辞典[M].北京:科学出版社,1984:64

[3] 冯康.数值计算方法[M].北京:国防工业出版社,1978:2-6,579-580

[4] 武汉大学、山东大学计算数学教研室.计算方法[M].北京:人民教育出版社,1979:338-347

[5] 李岳生,黄友谦.数值逼近[M].北京:人民教育出版社,1978:360-373

[6] 胡鹏,黄雪连,吴艳兰,等.DEM 若干理论问题思考[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(12):2 143-2 147

第一作者简介:胡鹏,教授,博士生导师。现主要从事 GIS 理论和方法、新型 3S 集成软件工具、地理信息工程等技术研究。

E-mail: penghu@whu.edu.cn

Elevation Order Isomorphism Characteristics of DEM

HU Peng^{1,2} BAI Yiduo¹ HU Hai¹

(1) School of Resources and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University,
129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: We discover and define the order isomorphism characteristics of DEM, then point out that the order isomorphism characteristics of elevation is one of the most important theoretical problems of DEM. Based on it, we prove that the prerequisite qualifications of order isomorphism of DEM are the topological correspondence with ground during interpolation being generated. Moreover, we demonstrate that the order isomorphism characteristics of three main interpolation methods about DEM generation.

Key words: DEM; topological correspondence; elevation order isomorphism; linear interpolation; triangle linear interpolation; double quasi-linearity interpolation

About the first author: HU Peng, professor, Ph. D supervisor. His main research orientations include GIS theory and technology, new 3S integration and GIS software tools and geographic information engineering.

E-mail: penghu@whu.edu.cn

武汉大学两项成果获国家科技进步二等奖

中共中央、国务院 2009 年 1 月 9 日在北京隆重举行国家科学技术奖励大会。这次共有 345 个项目获奖,其中,武汉大学两项成果获国家科技进步二等奖。这两个项目分别是“我国区域精密高程基准面建立的关键技术及推广应用”,主要完成人为李建成、姜卫平、姚宜斌、晁定波、杨俊岭、刘润荣、孙绍斌、方锋、罗满建、申文斌;“水电站过渡过程关键技术与工程实践”,主要完成人为杨建东、钮新强、刘宁、陈鉴治、陈文斌、胡斌、林可冀、冯树荣、邹丽春、赖旭。