

文章编号: 1009-6744(2006)01-0123-05

辽宁省公路交通网络的分形研究

张鹏, 韩增林

(辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

摘要: 分析了辽宁省公路交通网络的基本现状, 根据分形理论, 利用 Hausdorff 维数简化算法和空间关联维数的计算方法, 测算了以省内国道干线为基础的辽宁省公路交通网络的分维数和网络直通度。通过对比分析数值得出辽宁省干线公路网络的分维数比较低, 网络直通度比较高的结论。并指出辽宁省公路交通网络应从提高网络直通度向提升线路等级, 从而向缩短运输时间、增大运量的方向转移。

关键词: 分形理论; Hausdorff 维数; 空间关联维数; 网络直通度
中图分类号: U491.13

A Fractal-Theory-based Analysis on Liaoning's Highway Network

ZHANG Peng, HANG Zeng-lin

(The Sustainable Development Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: This paper analyzes the basic status quo of Liaoning's highway network. Based on the methods of Hausdorff fractal dimension and space relation fractal dimension, the paper advances calculation models on the fractal dimension and the arriving degree of network of Liaoning's highway network. The results have demonstrated that the Hausdorff fractal dimension is comparatively low and the space relation fractal dimension is high according to the ratio. The conclusions point out that Liaoning's highway network should shift its focus from increasing its arriving degree to improving its line grade so as to decrease its transport time and increase transport volume.

Key words: fractal theory; Hausdorff fractal dimension; space relation fractal dimension; arriving degree of network

CLC number: U491.13

0 引言

新中国成立以来, 经过 50 多年的建设和发展, 辽宁省已经形成了以省会沈阳为中心, 高速公路、国、省干道为主干线, 连通众多工矿基地、铁路站点、沿海港口, 贯穿全省各市、县、乡的公路网络。这一公路网络是以高速公路为主骨架的“一环六射”的网状格局系统。“一环”指以沈阳过境环城高速公路; “六射”指以沈阳为中心, 向铁岭—长春、抚顺—通化、丹东、大连、锦州—天津、朝阳 6 个方向辐射。

2002 年末, 辽宁省的公路通车里程达 48 051

公里, 其中高速公路 1 637 公里, 2 级以上公路 13 394 公里, 公路网密度为 32.9 公里/百平方公里, 位居全国前列。辽宁省现有的里程约 48 051 公里的公路中, 基本都是铺装公路, 等级公路占 50% 以上。全省高速公路以“沈—长”高速、“沈—大”高速、“沈—丹”高速和“京—沈”高速为主干线, 另有“大—庄”高速、“锦—朝”高速、“锦—阜”高速、“沈—抚”高速、“沟—海”高速等高速公路线路。辽宁省已在全国率先实现了 14 个地级城市全部用高速公路连接。“沈—大”高速公路被誉为“神州第一路”。全省由五条高速公路连接形成的环海高速公

收稿日期: 2005-08-09

张鹏(1979—), 辽宁沈阳人, 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心硕士研究生, 主要研究方向为交通运输地理、区域经济。Email: zhangpeng3128@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

路带已经初具规模。它联结了丹东、大连、营口、盘锦、锦州和葫芦岛6个沿海城市,形成了800公里的沿海大通道,成为辽宁省公路建设的经典之作。

经由辽宁省境内的国家干线公路(国道)有9条(见表1),省道24条,它们纵横交错,与高速公路一起构成了省内干线公路网络。

表1 辽宁省境内国道一览表

| 编号 | 名称 | 里程 | 起止点 | 主要经由 |
|------|----------|-------|---------------|----------------|
| G101 | 北京—沈阳线 | 539公里 | 石灰窑(省界)—沈阳 | 承德 |
| G102 | 北京—哈尔滨线 | 629公里 | 北邱河(省界)—牛哨 | 山海关、沈阳、长春 |
| G201 | 鹤岗—大连线 | 641公里 | 缸山岭(省界)—旅顺 | 牡丹江、敦化、通化 |
| G202 | 黑河—大连线 | 649公里 | 草市(省界)—旅顺 | 哈尔滨、吉林、沈阳 |
| G203 | 明水—沈阳线 | 158公里 | 辽阳窝棚(省界)—沈阳 | 肇源、松原、长岭 |
| G303 | 集安—锡林浩特线 | 80公里 | 平岗(省界)—天德(省界) | 辽源、四平、双辽、通辽、林东 |
| G304 | 丹东—霍林郭勒线 | 452公里 | 丹东—阿尔乡(省界) | 本溪、沈阳、彰武、通辽 |
| G305 | 庄河—林西线 | 459公里 | 庄河—大黑山(省界) | 营口、义县、朝阳、敖汉 |
| G306 | 绥中—克什克腾线 | 175公里 | 绥中—刘家窝棚(省界) | 凌源、赤峰 |

辽宁省的高等级公路组成的公路主骨架已基本形成,但是,随着辽宁老工业基地振兴脚步的加快和辽宁省经济的复苏,从国民经济发展与社会全面进步对运输需求的角度来分析,辽宁省的公路交通网络还存在如下问题:

- ① 公路交通设施总量仍显不足,能力依然紧张。
- ② 干线公路比重尚低。现全省干线公路比重为19.91%,低于全国24%的平均水平。
- ③ 干线公路网尚未全部实现黑色化。
- ④ 重要公路干线的辐射及与高速公路的衔接功能尚待改进。
- ⑤ 东西部山区普通公路技术水平低,抵抗自然灾害能力较弱。

2 辽宁省公路交通网络分维的测定

现引用 Hausdorff 维数简化算法对辽宁省干线公路网络进行测算,方法如下:

2.1 Hausdorff 维数的定义

一般而言,如果用尺度为 r 的小盒子覆盖一个 d 维的几何对象,则覆盖它所需要的小盒子数目 $N(r)$ 和所用尺度 r 的关系为

$$N(r) = 1/r^d \quad (1-1)$$

两边取对数,可得到

$$d = \ln N(r) / \ln(1/r) \quad (1-2)$$

式(1-2)即为拓扑维数,而 Hausdorff 维数等于确定其中一个点的位置所需要的独立坐标数目。一般对于一个 d 维几何对象,则 $N(r)$ 与 r 的关系也满足式(1-1)、(1-2),因为分形本身就是一种极限图形,所以对(1-2)取极限,可得分形维数 D 的定义

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)} \quad (1-3)$$

2.2 Hausdorff 维数简化算法

在实践中可将分维数的计算简化,粗略表述为:用间隔为 r 的格子把平面分割成边长为 r 的正方形网络,计量研究对象落入到正方形格子中的数目,并记为 $N(r)$ 。当使 r 变化时, $N(r)$ 亦随之变化。在 $N(r)$ 与 r 的 $\lg - \lg$ 关系图中,标绘出数据点,可以看出其对数关系呈线性。然后用最小二乘法拟合出一条直线并表示为

$$\lg N(r) = A - D \lg r \quad (1-4)$$

式中 D 实际上就是直线斜率的大小, D 值越大,则 $N(r)$ 增加得越快, D 值即为所研究对象的分维数值,将这种计算分维的方法称为 Hausdorff 简化算法。

2.3 研究意义

在以往的公路网络评价中,常用路网密度描述道路的密集程度,它以单位国土面积、或单位人口、或单位国土面积与单位人口乘积的平方根对应的平均公路长度来加以表示。该指标反映了公路网建设的总体规模与水平,但不能对路网的分布特征进行准确的描述。例如,具有相同长度的公路按不同均匀程度分布在相同面积的区域上,显然其密度指标是一样的,但实际上这两个路网的分布特征是不同的。而基于分形理论的路网覆盖形态评价模型是一种较为简单的近似算法,为路网覆盖形态指标的评价提供了较好的工具,引进基于分形理论的网络覆盖评价指标对于路网规划规模的合理性评价具有着重要的意义。

2.4 辽宁省公路网络维数的计算

根据辽宁省公路交通图和 Hausdorff 简化计算方法, 我们可以求出辽宁省公路交通网络分维数值。我们取四种标度 (r), r 分别为: 0.625cm、1.25cm、2.5cm、5cm 笛卡尔坐标网络, 对应的实际里程分别为: 9.5km、19km、38km 和 76km, 则边长为 r 的小正方形覆盖的研究对象数目如表 2 所示, 并将 r 与 $N(r)$ 绘制成双双对数关系图(图 1)。

表 2 标度 r 及其对应的落入格子中的公路线路数目 $N(r)$

| r (km) | 9.5 | 19 | 38 | 76 |
|----------|-----|----|----|----|
| $N(r)$ | 157 | 60 | 21 | 9 |

测算依据: 据《中国道路网地图集》中的辽宁省交通图 比例尺 (1: 1 520 000), 广东地图出版社编制出版, 2001。

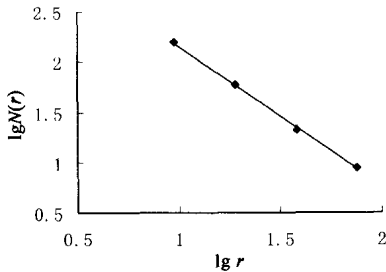


图 1 辽宁省干线公路交通网络双双对数坐标图

从 $\lg - \lg$ 坐标图中可以看出: 曲线的线性相当好, 用最小二乘法拟合得该直线的斜率, 取其绝对值即得分维值。

其斜率

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln r_i \cdot \ln N(r_i) - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln r_i \right] \left[\sum_{i=1}^n \ln N(r_i) \right]}{\sum_{i=1}^n [\ln r_i]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln r_i \right]^2} \quad (1-5)$$

求得数值为 -1.361 , 则分维数 $D = |-1.361| = 1.361$ 。

3 辽宁省公路交通网络的空间关联维数

3.1 基本定义

现引用刘继生等人提出的“空间关联维数”来研究辽宁省公路交通网络的通达水平和各地级城市间的连通程度。现假定某区域有 N 个城市, 这些城市之间的空间关联函数可由下式定义为

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_i^N \sum_j^N \theta(r - d_{ij}) \quad (2-1)$$

式中 $C(r)$ 为关联函数, r 为码尺 (yardstick), d_{ij} 为 ij 两城市之间的距离, θ 为 Heaviside 函数, 其基本性质是

$$\theta(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当 } d_{ij} \leq r \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } d_{ij} > r \text{ 时} \end{cases} \quad (2-2)$$

若 $C(r)$ 与 r 之间满足关系

$$C(r) \propto r^{D_s} \quad (2-3)$$

则系统是分形的。一般情况下, 点列 $(r, C(r))$ 并不完全呈对数线性分布, 而是存在无标度区和无标度区以外区域, 无标度区内点子呈对数线形分布。

在式 (1-1) 中, d_{ij} 可取直线距离 (亦称乌鸦距离, crow distance), 也可取实际交通距离 (亦称乳牛距离, cow distance)。当 d_{ij} 取直线距离时, 分维 D_{S2} 反映的是城市体系的空间分布特征; 只有当 d_{ij} 取实际交通里程时, 分维 D_{S1} 才反映城市之间交通网络的连通性状。

3.2 地理意义

城市交通网络的空间关联维数可以表征城市之间的连通程度, 即网络的通达水平。一般来说, 基于实际交通里程的关联维数越接近与直线距离的关联维数, 表明城市之间的连通性越好。现定义网络直通度 (亦称牛鸦维数比) 为

$$\rho = \frac{D_{S1}}{D_{S2}} \quad (2-4)$$

因 $0 \leq D_s \leq 2$, $D_{S1} \leq D_{S2}$, 一般有 $0 < \rho \leq 1$ 。可以认为: 当 $\rho < 0.5$ 时, 表明城市之间的网络连通性较差; 当 $0.5 < \rho < 1$ 时, 表明城市之间的网络连通性较好; 当 $\rho \rightarrow 1$ 时, 表明各城市之间接近于直线式连通。特别是, 当 $\rho = 1$ 时, 表明各城市之间的交通网络连通程度达到了极限, 但由于受自然地理等因素的影响, 导致交通线不能完全经济地直线向前而出现曲折, 形成偏差, 故此种情况几乎不存在。

3.3 辽宁省公路交通网络空间关联维数的测算

首先建立辽宁省 14 个地级城市之间基于公路实际里程的矩阵, 即借助交通图和有关数字资料计算各城市两两之间的实际交通里程, 构造一个矩阵 (见表 3), 由于该矩阵具对称性, 故一般只半角, 但在计算分维时, 必须加上另半角, 即总点数为 $N^2 = 14 \times 14$; 然后运用式 (2-1) 和 (2-3) 计算关联维数 D_s 。为了处理方便, 利用下式

$$(Nr) \propto r^{D_s} \quad (2-5)$$

$$N(r) = \sum_i \sum_j \theta(r - d_{ij}) \quad (2-6)$$

选择尺码 $r = 525, 500, 475, \dots, 25$ (显然, 步长 $\Delta r = 25\text{km}$), 相应的有 $N(r) = 196, 194, 192, \dots, 14$. 对表 3 中的数据不断“筛选”, 可得到点列 $(r, N(r))$ (见表 4), 将点列标绘在双对数坐标图

表 3 辽宁省 14 个地级城市的乳牛距离阵

| 沈阳 | 大连 | 鞍山 | 抚顺 | 本溪 | 阜新 | 锦州 | 丹东 | 辽阳 | 营口 | 盘锦 | 葫芦岛 | 铁岭 | 朝阳 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 沈阳 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 大连 | 385 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 鞍山 | 95 | 292 | 0 | | | | | | | | | | |
| 抚顺 | 46 | 431 | 134 | 0 | | | | | | | | | |
| 本溪 | 78 | 38 | 8 | 95 | 84 | 0 | | | | | | | |
| 阜新 | 205 | 435 | 186 | 251 | 262 | 0 | | | | | | | |
| 锦州 | 238 | 378 | 184 | 284 | 279 | 112 | 0 | | | | | | |
| 丹东 | 282 | 330 | 232 | 289 | 205 | 419 | 409 | 0 | | | | | |
| 辽阳 | 69 | 319 | 60 | 108 | 73 | 194 | 216 | 237 | 0 | | | | |
| 营口 | 179 | 220 | 84 | 214 | 117 | 205 | 144 | 280 | 110 | 0 | | | |
| 盘锦 | 155 | 291 | 97 | 201 | 192 | 143 | 93 | 324 | 122 | 61 | 0 | | |
| 葫芦岛 | 283 | 418 | 229 | 329 | 324 | 164 | 52 | 454 | 262 | 187 | 137 | 0 | |
| 铁岭 | 73 | 458 | 165 | 59 | 143 | 244 | 312 | 348 | 139 | 249 | 228 | 356 | 0 |
| 朝阳 | 308 | 480 | 291 | 354 | 365 | 141 | 106 | 517 | 297 | 250 | 200 | 127 | 373 |

测算依据: 据《中国城市公路行车指南》, 湖南地图出版社 2002

表 4 尺码 r 与“筛选”距离 $N(r)$

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| r | 525 | 500 | 475 | 450 | 425 | 400 | 375 | 350 | 325 | 300 | 275 |
| $N(r)$ | 196 | 194 | 192 | 188 | 184 | 178 | 172 | 164 | 158 | 148 | 128 |
| 序号 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | |
| r | 250 | 225 | 200 | 175 | 150 | 125 | 100 | 75 | 50 | 25 | |
| $N(r)$ | 122 | 106 | 92 | 76 | 70 | 54 | 44 | 30 | 16 | 14 | |

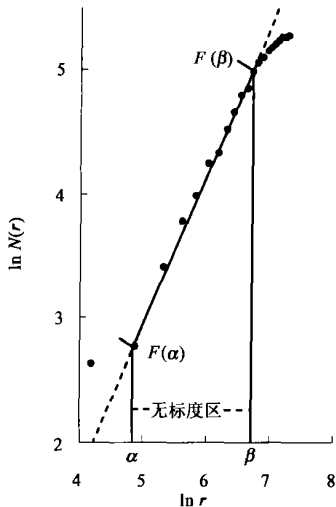


图 2 辽宁省 14 城市间交通网络的关联维数坐标图

上(见图 2), 发现存在明显的无标度区, 说明符合分形. 借助(1-5)对无标度区内的点列进行回归运算, 利用最小二乘法拟合出一条直线, 其表达式为 $y = a_1 + b_1$ 即 $\ln N(r) = a_1 + b_1 \ln r$. 其中 b_1 即为公路交通网络的空间关联维数 $D_{S1} = 1.1946$.

交通网络的空间关联维数 D_{S2} . 利用地图, 测量各城市两两间距 d_{ij} , 列成矩阵(见表 5), 确定尺码 $r = 2800, 2700, 2600, \dots, 100$. (步长 $\Delta r = 100$) 对应有 $N(r) = 196, 194, 194, \dots, 14$. 得到点列 $(r, N(r))$ (见表 6), 将点列绘在 $\ln - \ln$ 坐标图中, 发现存在明显的无标度区, 即点列成局部的对数线性分布(见图 3). 对无标度区内的点子进行回归运

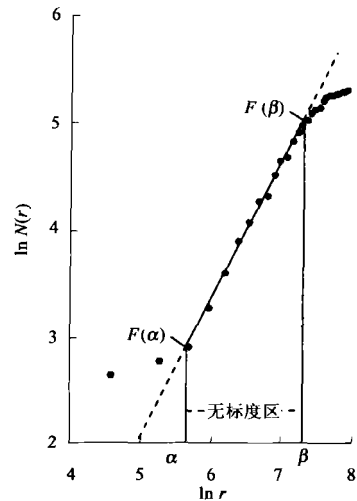


图 3 辽宁省 14 城市间交通网络的关联维数坐标图

比 $\rho = D_{S1}/D_{S2} = 0.931$.

表 5 辽宁省 14 个地级市的乌鸦距离阵

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 沈阳 | 大连 | 鞍山 | 抚顺 | 本溪 | 阜新 | 锦州 | 丹东 | 辽阳 | 营口 | 盘锦 | 葫芦岛 | 铁岭 | 朝阳 |
| 沈阳 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 大连 | 2 345 | 0 | | | | | | | | | | | |
| 鞍山 | 555 | 1 795 | 0 | | | | | | | | | | |
| 抚顺 | 279 | 2 510 | 743 | 0 | | | | | | | | | |
| 本溪 | 419 | 2 115 | 440 | 422 | 0 | | | | | | | | |
| 阜新 | 975 | 2 267 | 973 | 1 243 | 1 262 | 0 | | | | | | | |
| 锦州 | 1 351 | 1 634 | 1 013 | 1 623 | 1 440 | 719 | 0 | | | | | | |
| 丹东 | 1 328 | 1 785 | 1 049 | 1 283 | 910 | 2 032 | 1 921 | 0 | | | | | |
| 辽阳 | 415 | 1 945 | 150 | 600 | 327 | 979 | 1 120 | 1 068 | 0 | | | | |
| 营口 | 1 061 | 1 340 | 553 | 1 276 | 959 | 1 024 | 674 | 1 250 | 680 | 0 | | | |
| 盘锦 | 898 | 1 648 | 502 | 1 150 | 934 | 680 | 510 | 1 461 | 610 | 337 | 0 | | |
| 葫芦岛 | 1 560 | 1 411 | 1 201 | 1 870 | 1 644 | 1 020 | 307 | 2 001 | 1 322 | 760 | 725 | 0 | |
| 铁岭 | 430 | 2 775 | 980 | 316 | 732 | 1 223 | 1 725 | 1 600 | 875 | 1 491 | 1 302 | 2 000 | 0 |
| 朝阳 | 1 641 | 2 050 | 1 436 | 1 922 | 1 826 | 740 | 510 | 2 410 | 1 510 | 1 274 | 950 | 633 | 1 948 0 |

测算依据: 据《中国道路网地图集》中的辽宁省地图(比例尺 1: 1 520 000), 广东地图出版社编制出版, 2001 (注: 表中数据单位取 0. 1mm 数据精确到 mm)

表 6 码尺 r 与“筛选”距离 $N(r)$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| r | 2 800 | 2 700 | 2 600 | 2 500 | 2 400 | 2 300 | 2 200 | 2 100 | 2 000 | 1 900 | 1 800 | 1 700 | 1 600 | 1 500 |
| $N(r)$ | 196 | 194 | 194 | 192 | 190 | 188 | 186 | 184 | 178 | 168 | 164 | 158 | 148 | 142 |
| 序号 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| r | 1 400 | 1 300 | 1 200 | 1 100 | 1 000 | 900 | 800 | 700 | 600 | 500 | 400 | 300 | 200 | 100 |
| $N(r)$ | 132 | 122 | 106 | 102 | 90 | 74 | 70 | 58 | 48 | 36 | 26 | 18 | 16 | 14 |

4 结论

据管楚度计算, 20 世纪 90 年代初德国高速公路网分维数为 1. 538; 美国洲际公路网分维数为 1. 515, 其中密西西比河以西为 1. 426, 以东为 1. 677; 60 年代初期日本高速公路网络分维数为 1. 316; 中国规划 2020 年国道干线分维数是 1. 226. 可知: 在目前经济发达的基础上干线公路网的平均分维数 $D_0 \approx 1.5$ 是常态的, 而目前辽宁省干线公路网络分维数是 1. 361, 虽高于全国水平但大大低于发达国家水平, 并且本文计算分维以省内国道为基础, 也低于国外通常的以高速公路为基础, 如果统一口径, 数值将更低.

由于分维数与公路网密度、经济发达程度之间存在正相关关系, 所以目前辽宁省公路网的分维数基本反映了其经济发达程度. 为迎接老工业基地的振兴, 辽宁省交通基础设施应先行, 其中高速公路和干线公路的发展应定位在全国上游水平, 并适度超前于地区经济发展水平, 力争达到国际先进水平.

辽宁省公路交通网络直通度为 0. 931, 介于 0. 5 ~ 1 之间, 视为连通性较好. 据刘继生等计算河南省公路交通网络直通度为 0. 927, 比辽宁省略低. 另外, 由于国土形状的限制, 降低了辽宁省的

直通度, 如果不计算大连和葫芦岛两市, 直通度将为 0. 940, 说明, 至少辽宁省各地级城市之间干线公路网络的通达性很好. 如前所述, 辽宁省以高速公路和一级公路为代表的干线公路比重尚低, 所以今后努力的目标应从提高网络直通度向提升线路等级, 从而缩短运输时间、增大运量的方向转移.

参考文献

- [1] 叶宝玉, 刘家仁, 米德长. 东北区运输地理[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2002.
- [2] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] 管楚度. 交通区位论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [4] 刘继生, 陈彦光. 交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 471—477.
- [5] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 171—177.
- [6] 岳文泽, 徐建华, 等. 分形理论在人文地理学中的应用研究[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(2): 51—56.
- [7] 国家统计局. 辽宁省统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [8] 马德良, 李巧茹, 魏连雨. 分形理论在公路网络评价中的应用[J]. 内蒙古公路与运输, 2001, 增刊: 26—27.