

DEM 水平分辨率对流域特征提取的影响分析

鲍伟佳, 程先富, 陈旭东

(安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003)

摘 要:在基于数字高程模型(DEM)的流域地形分析中,栅格 DEM 的分辨率对分析结果具有很大的影响。以舒城县内面积为 7.9 km² 的龙潭小流域作为研究区域,分别对分辨率为 5 m×5 m~50 m×50 m 的 10 幅 DEM 数据进行流域特征提取和分析,计算地形指数并分析其分布特征。研究表明:在小流域尺度上,DEM 分辨率的变化对流域面积、最长河道长度等参数影响不大,对河道总长度、河网密度及平均坡度等参数有较大影响,对流域特征的提取影响规律为 DEM 分辨率越低,提取的流域特征越粗糙;且分辨率低于 15 m 的 DEM 计算出的地形指数值较为离散、概率分布曲线形状较之 5 m 分辨率 DEM 的地形指数概率分布曲线有明显不同,表明分辨率低于 15 m 的 DEM 对小流域水文地形信息的反映较差,为小流域尺度水文模型 DEM 数据适宜分辨率选取提供一定的理论依据。

关键词:DEM; 小流域; 分辨率; 流域特征; 地形指数

中图分类号:TP79 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2011)02-0129-04

Effect of Horizontal Resolution of Raster DEM on Drainage Basin Characteristics

BAO Wei-jia, CHENG Xian-fu, CHEN Xu-dong

(College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China)

Abstract:Based on digital elevation model (DEM) of the watershed terrain analysis, raster DEM resolution on the results of the analysis has great impact. In this paper, taking Longtan small watershed inupstream of the Hangpu river basin as an example, by means of ten different spatial resolution DEMs of the study watershed from 5 m to 50 m respectively, the basin characteristics were extracted with ArcHydro Tools to investigate the effects of DEMs in different spatial resolution on the performance of the simulations induced by the topographic characteristic parameters. The statistical results showed no evident different derived in the watershed area and longest channel length retrieval from different resolution DEMs, but greater differences were found in total channel length and channel density extractions in small watershed scale. The change of channel density tends to be stable when DEM resolution is lower than 15 m. Compared the extracted results under different resolution of DEMs, it was found that the bigger size of DEM raster is, the more rough extraction of watershed characteristics are. For examining the distribution Curves of Topographic Index (TI) calculated by different grid resolution, it was found that TI was influenced by DEM resolution, TI fluctuates evenly when the highest resolution DEM was employed, but considerably with the poorest resolution DEM being used. The distribution curves of TI calculated by lower than 15 m grid resolution were more discrete and had large different from the highest resolution DEM being used, which implies its potential usage in Suitable resolution selection.

Key words:DEM; small watershed; horizontal resolution; drainage basin characteristic; topographic index

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是地理信息系统地理数据库中最为重要的空间信息和赖以进行地形分析核心数据系统^[1]。其中栅格 DEM 由于其结构简单、适合于计算机处理和存储等特征而被广泛应用于流域地形分析中。由 DEM 提取流域水文特征的关键步骤是确定单元格的水流

收稿日期:2010-08-30 修回日期:2010-09-30

资助项目:安徽省自然地理学重点学科(AH021);安徽省自然科学基金项目(090415212)

作者简介:鲍伟佳(1986—),男,安徽南陵人,硕士研究生,主要从事地理信息系统软件开发与应用研究。E-mail:ric_bob@163.com

通信作者:程先富(1967—),男,安徽合肥人,教授,博士,主要从事农业资源与信息技术的教学与研究工作。E-mail:xianfucheng@sina.com

流向,因而流向算法和 DEM 的分辨率是影响特征提取精度的主要因素。国内外学者在这些方面进行了大量的研究,刘学军^[2]等通过对比汇水面积对目前流行的 5 种路径算法进行比较,得出 D8^[3]算法较之其他算法虽然计算精度较低,但由于其计算效率高并对地形有较强的适应能力^[2],而被普遍使用;吴险峰^[4]、易卫华^[5]等则在大、中型流域内分析了 DEM 分辨率对流域特征的影响,DEM 的水平分辨率对提取河网的精确性有影响,网格的增大增加了平地处流向的随意性^[4],网格单元越小,提取结果越精确。而地形指数^[6]自 1979 年由 Beven 等提出以来,已被广泛应用于水文模拟及集水区经营等相关研究^[7]。解河海^[8]等通过对比地形指数概率分布情况比较了单流向、多流向等算法的提取结果并提出了改进多流向算法。前人的研究大多集中在大、中型流域尺度上,且都拥有实测数据可以和流域特征提取结果进行对比,进而得出最适宜的 DEM 分辨率,在小流域尺度上且缺乏实测数据情况下的研究较少,所以通过对比不同分辨率 DEM 的流域特征提取结果和地形指数计算结果来选取适合的 DEM 分辨率是十分必要的。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

本文选取杭埠河上源晓天河位于安徽省舒城县龙潭村的小流域作为研究区,流域面积 7.9 km²,海拔 100~540 m。研究区的地理位置及 DEM 见图 1。该地区属亚热带湿润性季风气候区,年平均气温 15.6℃,年平均降雨量 1 100 mm,无霜期年平均 224 d,四季分明,气候温和。

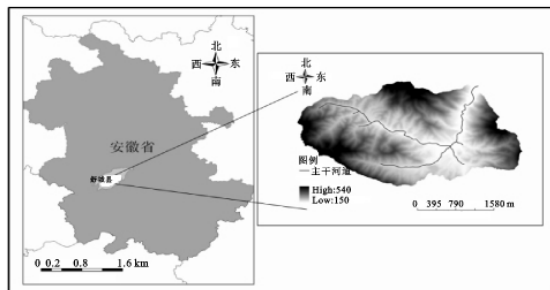


图 1 研究区地理位置及 DEM

1.2 基础数据

研究采用的原始数据是中国人民解放军总参谋部测绘局编绘的 1984 版的 1:1 万纸质地形图。采用 1954 北京坐标系,1956 黄海高程系,等高距为 5 m。利用 ArcView 对扫描后的地形图等高线和高程点进行数字化,在 ArcView 空间分析模块下把等高线和高程点数据转换成 TIN,再由 TIN 依次内插成

水平分辨率为 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50 m 的栅格 DEM。

1.3 流域特征提取方法

本文采用美国 ESRI (Environmental Systems Research Institute) 公司提供的 ArcHydro Tools 水文扩展模块提取流域特征。常用的基于 DEM 提取流域特征的软件还有 RIVIX 提供的 River Tools、Garbrecht 和 Martz 的 TOPAZ 工具、美国 Brigham Young 大学环境模型研究实验室开发的 WMS 等。

使用 ArcHydro Tools 提取流域特征包括以下 5 个流程:DEM 的预处理、水流流向的确定、汇流栅格的生成、自动生成河网、自流域边界的划分^[9]。

DEM 的预处理包括“burn-in”主干河网和填洼两部分,通过采用 Agree^[10]方法“burn-in”主干河道来解决平坦地区的伪河道问题,并通过增加洼地高程值的方法进行填洼,使生成的河网连续。而在单元格流向确定方面则基于最陡坡面径流模拟方法,使用 1984 年由 Mark 等提出的 D8 单流向算法。该算法假设单元格中的水流只有 8 种可能的流向,即流入与值相邻的 8 个网格中。它用最陡坡度法来确定水流的方向,即在 3×3 的 DEM 格网上计算中心网格与各相邻网格间的距离权落差(即网格中心点落差除以网格中心点之间的距离),取距离权落差最大的网格为中心网格的流出网格,该方向即为中心网格的流向^[11]。所有单元格流向确定后,便可计算出各单元格的上游汇流面积。河网则是通过设定最小集水面积阈值,集水面积大于等于该阈值则为河道这一方法自动生成的。设定的阈值越小,生成的河网越细密。最小集水面积阈值的大小应根据实际地形、气候等因素而确定,但由于缺乏实测资料,因此本文则是采用所有单元格汇流面积的平均值作为最小集水面积阈值,即为 7 650 m²。

1.4 地形指数计算方法

$$T_i = \ln(\alpha / \tan \beta) \quad (1)$$

式中: T_i ——地形指数; α ——单元长度等高线上游集水区(或特定的集水区)的面积; β ——单元格的坡度。当前基于 GIS 的地形指数计算法则主要包括单流向算法(SFD),双流向算法(BFD)和多流向算法(MFD)。多流向算法则被普遍认为是其中最为精确的一种^[12]。本文采用单流向算法即 D8 算法来计算地形指数。D8 算法假定有效的等高线长度等于单元格长度,而坡度即为顺坡方向的最大坡度。因此 D8 算法的地形指数的表达式如式(2)。

$$\ln(\alpha / \tan \beta) = \ln\left(\frac{A/L}{\Delta h / \Delta l}\right) \quad (2)$$

式中: A ——单元格上游集水面积; L ——单元格长度; Δh ——相邻栅格的最大高程差; Δl ——具有最大高程差的两个相邻栅格单元的中心距离。

2 流域特征参数分析

将 5~50 m 分辨率的 10 套 DEM 数据导入 ArcGIS 并使用 ArcHydro Tools 模块进行计算分析。通过 DEM 预处理 (DEM Reconditioning)、填洼 (Fill Sinks)、确定水流流向 (Flow Direction)、上游集水面

积计算 (Flow Accumulation)、生成河网矩阵 (Stream Definition)、河网分级 (Stream Segmentation)、划分集水区 (Catchment Grid Delineation) 等步骤,定义最小集水面积阈值统一为 7 650 m²,并给定相同位置的流域出水口便可以计算出流域面积、河道总长度、最长河道等流域特征值,再使用 ArcGIS 软件中的空间分析功能可以计算出最长河道平均坡度和流域平均坡度等流域特征值。计算的流域特征值如表 1 所示。

表 1 不同 DEM 分辨率流域特征参数表

分辨率/m	流域面积/ m ²	河道总长度/ m	河网密度/ (m·m ⁻²)	最长河道/ m	最长河道 平均坡度/%	流域平均 坡度/%
5	7974150	54742.78	0.00687	5941.48	5.99	43.73
10	7967300	41727.02	0.00524	5839.55	5.08	44.00
15	7950600	35638.02	0.00448	5799.70	6.67	42.92
20	7962800	30519.36	0.00383	5676.71	6.50	41.59
25	7949375	27199.83	0.00342	5628.43	6.66	40.22
30	7947000	23902.31	0.00301	5567.42	6.54	38.73
35	7935550	22408.18	0.00282	5687.84	6.31	37.73
40	7942400	20459.74	0.00258	5468.43	6.23	35.12
45	7931925	19813.66	0.00250	5507.86	6.36	35.37
50	7925000	18024.19	0.00227	5366.30	6.47	34.12

从表 1 可以看出,栅格 DEM 的分辨率对计算所得的数字流域面积影响不大,流域面积最大值和最小值的差仅为平均值的 0.62%,流域面积值随 DEM 栅格尺寸的增大总体呈平缓下降趋势,20 m 分辨率和 40 m 分辨率 DEM 处有局部回升。造成流域面积变化的主要原因是随着 DEM 分辨率的下降,流域边界地区的栅格高程值被概化,致使所确定得边界地区栅格水流流向不同,且具有不确定性。

在河道长度方面,计算得出的河道总长度随着 DEM 分辨率的下降而急剧减小,其最小值仅为最大值的 32.93%,而提取出的最长河道长度则变化平缓且呈无规律性,平均值为 5 648.37 m,最大偏差为 293.11 m,偏差幅度为 5.19%(如图 2 所示)。虽然在提取河网时所采用的最小集水面积阈值统一为 1 030 m²,但受 D8 法限制,格网大小的变化会导致格网流向的变化,河道起始点的空间位置也会发生相应的改变,引起河流长度的变化^[5]。加之由于 DEM 栅格尺寸越小,所提取的河道分级越细密,河道数目增加,从而使得河道总长度有明显增幅。而提取出的最长河道变化表现出无规律性也同样是由分辨率的变化会导致单元格流向的变化,从而使得最长河道起点的空间位置不同所造成。

由于 DEM 分辨率对流域面积的影响不大,而河网密度是河道总长度和流域面积的比值,因此河网密度的变化规律与河道总长度的变化规律极为相似。

河网密度是反映流域河网发育程度的重要参数,河网密度越高说明流域河网发育越完全。从图 3 可看出,河网密度随 DEM 分辨率的升高呈减小趋势,且在 15 m 分辨率后变化趋于平缓。孔凡哲等人研究了集水面积阈值与河网密度的变化关系并指出:当集水面积阈值增大时,坡地网链逐渐移走;当增大到一临界值时,坡地网链全部从河网中移出^[13]。在集水面积阈值不变、DEM 分辨率为变量时,河网密度变化规律亦可作相同解释。

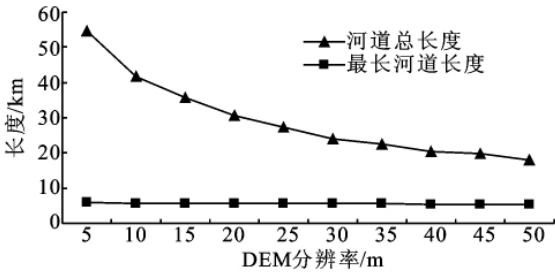


图 2 河道总长度与最长河道长度变化情况

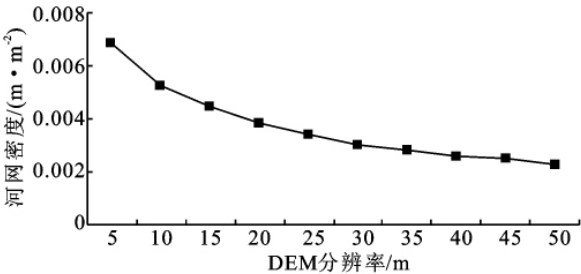


图 3 河网密度变化情况

最长河道平均坡度即河道纵比降,为最长河道栅格单元高程值的平均变化率。随 DEM 分辨率变化情况由图 4 所示,除在 10 m 分辨率 DEM 处有较强降幅外,其余分辨率 DEM 所提取的最长河道平均坡度皆变化不大,平均变化率为 6.21%,且具有很大的随意性。从图 5 中可看出随着 DEM 分辨率的降低,流域平均坡度缓慢下降,平均降幅为 2.72%。造成平均坡度变化的原因是由于栅格尺寸增大对单元格高程值有概化作用,降低了地形的复杂度,而导致最长河道平均坡度变化的主要原因是被概化后的栅格单元流向判别发生改变,从而使得最长河道起点空间位置不同。

3 地形指数分布特征分析

将由 5~50 m 分辨率 DEM 提取的上游集水面积栅格图和坡度图分别进行栅格计算得出 10 幅地形指数空间分布图,并统计其最大值、最小值、平均值、标准差等特征值,如表 2 所示。

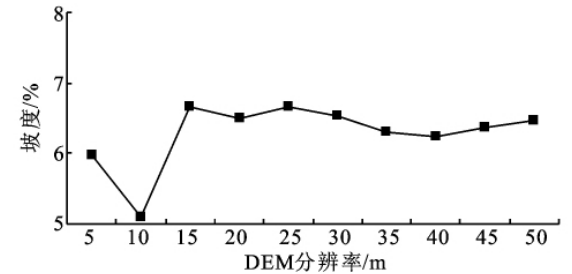


图 4 最长河道平均坡度变化情况

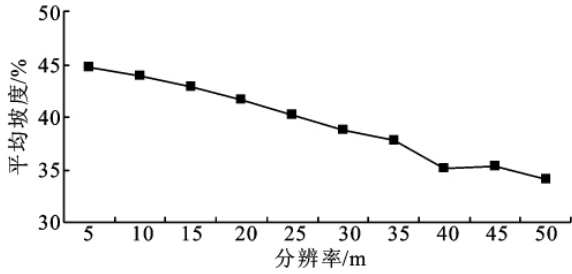


图 5 平均坡度变化情况

表 2 不同 DEM 分辨率地形指数特征值

分辨率/m	最小值	最大值	平均值	标准差
5	0.84	20.66	4.59	1.89
10	1.92	19.02	4.97	2.02
15	2.35	19.60	5.29	2.12
20	2.81	18.78	5.59	2.19
25	3.12	16.25	5.87	2.24
30	3.41	16.19	6.12	2.27
35	3.67	16.74	6.34	2.30
40	3.83	20.30	6.63	2.31
45	3.95	15.84	6.70	2.32
50	4.10	17.19	6.88	2.34

由表 2 可以看出提取的地形指数随 DEM 栅格尺寸的增大,地形指数最小值、平均值和标准差均增大,而最大值整体呈减小趋势。通过地形指数的表达式 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 可以看出:地形指数最小值应分布在地形变化复杂的地区,而最大值应分布在地形平缓地势较低的流域出水口地区。在地形变化复杂的地区,降低 DEM 分辨率所产生的高程值概化作用较强烈,地形变化程度有所降低,坡度减小,是地形指数最小值增大的主要原因;而最大值的变化规律则难以解释。地形指数的平均值随 DEM 分辨率降低而增大的主要原因也同样是高程值概化作用。标准差的增大说明 DEM 分辨率越低则地形指数值分布越为离散。

由于地形指数的物理意义明确,即具有相同地形指数的点对于具有相同的水文相应,而具有相同地形指数概率分布的流域具有水文相似性^[14-15],因此研究由不同分辨率 DEM 提取的地形指数概率分布具有很重要的意义。

分别统计 5~10 m 分辨率 DEM 的地形指数概率分布,得出图 6。

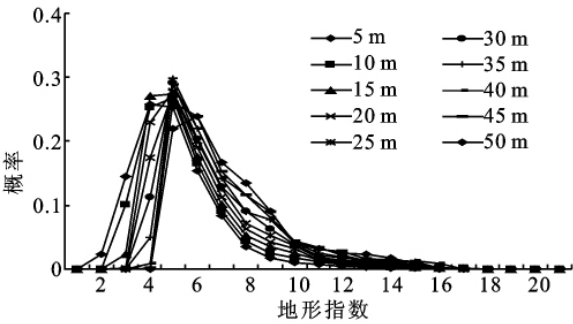


图 6 不同 DEM 分辨率地形指数概率分布

由图 6 可看出,10 套地形指数生成的概率分布图均为单峰状,5 m 分辨率 DEM 地形指数概率曲线最为平滑均匀,随着栅格尺寸的增大,分布图高值部分逐渐增多,曲线呈右偏趋势。5,10,15 m 分辨率 DEM 所提取的地形指数概率分布曲线形状极为相似,因而可以推断这 3 种分辨率的 DEM 能够反映相似的水文特征。

4 结论

(1)通过对比不同分辨率 DEM 提取的流域特征参数值可以看出,在本研究区内 DEM 分辨率越高,提取的河网越细密,而对流域面积、平均坡度等特征影响不大。

(2)DEM 分辨率对流域特征提取结果的影响主要体现在栅格单元高程值的概化作用,在地形复杂的地区该作用表现的更为突出。

台河口湿地环境的有利影响大于不利影响。减少不利影响的措施主要有:(1)水质方面。建立城市污水处理厂、建立湿地污水处理系统、控制有机磷类农药的使用、增加环境用水量等;(2)土壤方面。减少落地原油的排放和输油管道的“跑、冒、滴、漏”、增施有机肥、稻草还田、炉渣改良黏质水稻土等;(3)水生生物方面。发展人工养殖、工程措施和综合治理污染;(4)泥沙方面。改造盘山闸、制定正确的闸门运用技术规程、加强柳河流域水土保持治理工作、定期清淤。

由于时间、数据来源等多方面因素的限制,本研究仍然存在许多不足。现行的评价体系还存在着很多缺陷;目前所进行的湿地环境影响评价是在单一尺度上对区域的环境影响评价,忽略了生态系统作为系统的属性,即大尺度的生态系统服务功能价值不单一的等于各小尺度的生态系统服务功能价值的总和。这些不足也是本课题组正在努力解决的问题。

参考文献:

- [1] 崔丽娟. 湿地价值评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

(上接第 132 页)

(3)在分析河网密度时发现,由 15 m 分辨率 DEM 所得出的河网密度值趋于稳定,提取的河网中坡度网链被移除,消除了由更高分辨率 DEM 提取的河网冗余;而在分析地形指数概率分布时发现,5, 10, 15 m 这 3 种分辨率的 DEM 能够反映相似的水文特性,因而可以判定 15 m 分辨率为本研究区域较合理的 DEM 分辨率。

参考文献:

- [1] 汤国安,赵牡丹,曹菡. DEM 地形描述误差空间结构分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2000, 30(4): 349-352.
- [2] 刘学军,卢华兴,卞璐. 基于 DEM 的河网提取算法的比较[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1134-1141.
- [3] Callaghan F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323-344.
- [4] 吴险峰,刘昌明,王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 148-154.
- [5] 易卫华,张建明,匡永生. 水平分辨率对 DEM 流域特征提取的影响[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 34-38.
- [6] Quinn P F, Beven K J, Lamb R. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOP-

- [2] 张素珍,李晓粤,李贵宝. 湿地生态系统服务功能及价值评价[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 125-128.
- [2] 庄大昌,丁登山,董明辉. 洞庭湖湿地资源退化的生态经济损益评价[J]. 地理科学, 2003, 23(6): 680-685.
- [3] 汤蕾,许东. 辽河三角洲湿地生态旅游资源评价与开发[J]. 辽宁林业科技, 2006(1): 26-29.
- [4] 殷康前,倪晋仁. 湿地研究综述[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 542-544.
- [5] 周广胜,周莉,关恩凯,等. 盘锦湿地生态系统野外观测站概况[J]. 气象与环境学报, 2008, 22(4): 1-6.
- [6] 翟金良,何岩,邓伟. 向海国家级自然保护区湿地功能研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 5-9.
- [7] 沈德贤. 洞庭湖湿地生态功能及其保护对策[J]. 人民长江, 1999, 30(12): 23-24.
- [8] 张志强,徐中民,程国栋. 条件价值评价法的发展与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 454-463.
- [9] Barton D N. The transferability of benefit transfer: contingent valuation of water quality improvements in Costa Rica[J]. Ecological Economics, 2002, 42: 147-164.
- [10] Chee Y E. An ecological perspective on the valuation of ecosystem services[J]. Biological Conservation, 2004, 120: 549-565.
- [10] Hellweger F. AGREE-DEM Surface Reconditioning System[DB/OL]. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/ferdi/ferdi/research/agree>, 1996.
- [7] 庄永忠,廖学诚,詹进发. 不同网格解析度与流向演算法对莲华池集水区地形指标之影响[J]. 地理学报(台湾), 2007, (50): 73-100.
- [8] 解河海,黄国如. 地形指数若干计算方法探讨[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 46-50.
- [9] 唐从国,刘丛强. 基于 Arc Hydro Tools 的流域特征自动提取: 以贵州省内乌江流域为例[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 30-37.
- [11] 李丽,郝振纯. 基于 DEM 的流域特征提取综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 251-256.
- [12] Bin Yong, Wan Changzhang, Guo Yueniu. Spatial statistical properties and scale transform analyses on the topographic index derived from DEMs in China[J]. Computers & Geosciences, 2009(35): 592-602.
- [13] 孔凡哲,李莉莉. 利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J]. 水电能源科学, 2005, 23(4): 65-67.
- [14] Beven K J, Kirkby N J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [15] 邓慧平,李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 103-110.