

地貌发育阶段判识方法研究

——以泥河沟流域和枣子沟流域为例

郑伟,张鑫,童亚文,张青峰*

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:为更加准确判识小流域地貌发育阶段,以黄土高原综合治理小流域——陕西省淳化县泥河沟流域和乾县枣子沟流域为例,分别应用盒分维方法和 Horton 分维方法进行水系分维值的计算,并利用面积高程积分和地貌信息熵进行验证。结果表明,泥河沟和枣子沟流域水系盒分维值分别为 1.886 和 1.827。根据 Strahler 曲线积分值和地貌信息熵方法验证结果表明,盒分维方法计算的水系分维值对流域地貌发育阶段的判识更加准确、可靠;这 2 个流域地貌处于侵蚀发育阶段的壮龄期,其生态敏感性整体上处于较低水平,生态环境抗干扰能力增强并趋于更加稳定的状态。

关键词:流域地貌;分维;泥河沟;枣子沟

中图分类号:S771.55

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)02-0197-05

Identification Methods of Geomorphological Development Stage

——Case Studies of Nihegou and Zaozigou Catchments

ZHENG Wei, ZHANG Xin, TONG Ya-wen, ZHANG Qing-feng*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to identify the geomorphic evolution of small catchments accurately, two typical small catchments (Nihegou and Zaozigou, located in Chunhua and Qianxian, Shaanxi Province, respectively,) in which the projects of comprehensive management of small catchments on the Loess Plateau of China have been conducted. The fractal dimension values of the two catchment were calculated by the Box fractal method and the Horton fractal method, and the results were verified by using the methods of the area-elevation integral and geomorphic information entropy. The results showed that the box fractal dimension values of the drainage systems of Nihegou and Zaozigou catchments were 1.886 and 1.827, respectively. According to the results of Strahler curve integral and geomorphic information entropy methods, the Box fractal method was more accurate and reliable for identifying the geomorphic evolution of the catchments. In conclusion, the erosional development stage of the two catchments is in the adolescent period. The ecological sensitivity is generally at a low level, and the anti-interference ability of the ecological environment is enhanced and tends to be more stable.

Key words: catchment topography; fractal dimension; Nihegou catchment; Zaozigou catchment

流域地貌在形态和空间分布方面具有显著的分形结构,对其科学准确量化有助于揭示流域地貌的综合特征^[1]。为此,诸多学者采用不同分形计算方法^[2-8]对流域地貌进行了量化判别研究,其研究方法

大致可分为盒分维方法和 Horton 分维法两大类。其中,盒分维方法能从整体上刻画水系的复杂程度^[9],适用于可概化为面状的具有三维立体特性的地貌现象^[3]。Horton 分维法从一定程度上体现特

收稿日期:2019-04-08 修回日期:2019-11-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371273)。

作者简介:郑伟,男,硕士在读,研究方向为 GIS 设计与数字制图。E-mail:1525358734@qq.com

*通信作者:张青峰,男,教授,博士生导师,研究方向:土地资源与空间信息技术。E-mail:zhqf@nwsuaf.edu.cn

定流域水系形态的复杂程度,适用于流域水系本身满足分形树结构^[10]。这2种方法分别用于流域地貌侵蚀发育阶段、流域地貌形态的信息维数、流域水系特征、河流分支结构、沟道长度与汇水面积的关系、灌区渠系特征等的判定与分析。然而,针对某一特定流域地貌发育阶段的判识,鲜有采用这2类方法的对比研究。

自“六五”至“九五”期间,陕西省淳化县泥河沟流域和乾县枣子沟流域经过20 a的小流域综合治理,植被得到恢复和改善,水土流失得到控制,土地生产力有了很大提高^[11]。此后,流域又经过20多a的自然保育,那么该流域地貌现状能否反映小流域综合治理的成效,也有待于进一步研究。

为此,以泥河沟流域和枣子沟流域为例,采用盒分维方法和 Horton 分维方法对其侵蚀地貌发育阶段进行判识,并通过面积高程积分及地貌信息熵进行验证,以期为地貌发育阶段的精确判定提供可靠的方法依据,也可为流域今后的治理方略提供参考。

1 研究区概况与数据来源

陕西省淳化县泥河沟流域(108°37′—108°40′E, 34°45′—34°50′N)属于黄土高原残塬沟壑区,南北长7.8 km,东西宽1.3 km,总土地面积10.1 km²。其中,塬面和沟壑面积分别占总面积的59.2%和40.8%。流域属暖温带半湿润半干旱气候,年均降水量600.0 mm,年均气温9.8℃,日照充足,气温日较差较大;降雨分配不均,7—9月的降水量占全年降水总量的53%左右。流域土层深厚,土壤主要为黄绵土和红圪土,局部地方有碳酸盐褐土。自然植被分布于沟坡,以草本和灌木为主;塬面主要为人工植被。

陕西省乾县枣子沟流域(108°6′—108°9′E, 34°37′—34°40′N)属于黄土高原台塬沟壑区,南北长5 km,东西宽1.5 km,总土地面积7.5 km²。流域属暖温带半干旱气候,年均降水量584.2 mm,日照充足,气温日较差较大;降雨分配不均,7—9月的降水量占全年降水总量的54%。流域土壤主要为黄壤土,易受暴雨冲刷。

本文所使用 DEM 数据(空间分辨率为30 m×30 m)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

2 研究方法

2.1 水系提取与分级

流域地貌常通过水系分维值来进行判定。本文利用 ArcGIS10.6 软件,按照填洼→流向→流量→河流链接^[12]的步骤对水系进行提取。其中,在栅格河

网的生成中,需设置一个汇流累积阈值。经过反复实验,当汇流累积阈值设为150个单位时,所提取的水系与实际情况基本吻合。随后,采用 Strahler 分级方法对水系河网进行分级,统计各级水道的数目和长度,并对栅格水系河网进行矢量表达(图1、图2)。

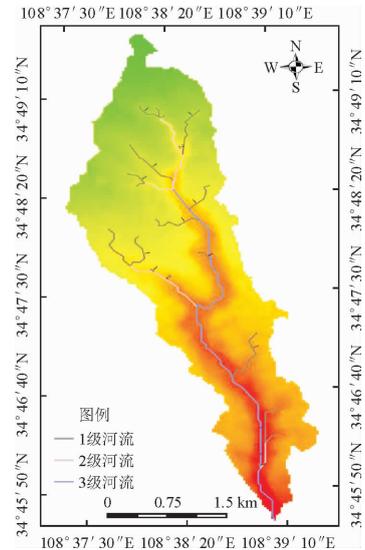


图1 泥河沟 DEM 水系分布

Fig. 1 Drainage system distribution map at DEM of Nihegou

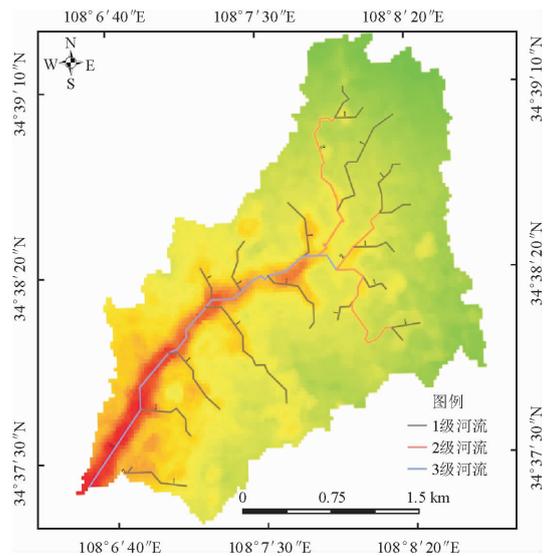


图2 枣子沟 DEM 水系分布

Fig. 2 Drainage system distribution map at DEM of Zaozigou

2.2 水系分维值计算及流域地貌发育阶段判定

水系分维值计算方法见表1。

根据何隆华等^[2]、王玉成等^[14]和任娟等^[15]的研究,无论是 D_i 还是 D_h , 当水系分维值 $D \leq 1.6$ 、 $1.6 < D \leq 1.89$ 、 $1.89 < D \leq 2.0$ 时,分别代表流域地貌发育的幼龄期、壮龄期和老龄期。幼龄期地貌的水系尚未充分发育,河网密度小,地面比较完整,河流深切侵蚀剧烈,河谷呈“V”形。 D 越趋近1.6,流域地貌越趋于幼年晚期,河流下蚀作用逐渐减弱,旁蚀

作用加强,地面分割得越来越破碎,谷坡的分水岭变成了锋锐的岭脊;壮龄期流域地貌地势起伏大、地面切割得支离破碎,在河流的侧蚀、重力作用和坡面冲刷下,尖锐的分水岭山脊不断蚀低,谷坡变得平缓,

山脊变得浑圆,地面由原来的峭峰深谷,变成低丘宽谷;老龄期流域地貌的河流作用主要为旁蚀和堆积,下蚀作用已很微弱,地势起伏微缓,形成宽广的谷底平原^[2]。

表1 水系分维值计算方法

Table 1 Calculation method of drainage system fractal dimension

方法	公式及字母含义	参考文献
盒分维	$D_i = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r}$	对于某一水系,假设被边长为 r 的格网覆盖,其中: r 为格网的边长, $N(r)$ 为网格数目 ^[2]
Horton 分维	$D_h = \begin{cases} \min(\frac{\lg R_B}{\lg R_L}, 2) & R_B > R_L \\ 1 & R_B \leq R_L \end{cases}$ $R_B = N_w / N_{w-1} \quad R_L = L_{w-1} / L_w$ $N_w = R_B^{w-w_0} \quad L_w = L_1 R_B^{w-1}$	R_B 为水系分枝比, R_L 为水系长度比; N_w 为第 w 级河流的数目, L_1, L_w 分别为第 1、 w 级河流的平均长度; w 为水系级别号, W 为河流最高级别 ^[8,13]

2.3 验证方法

利用等间距分割方法对整个流域范围内的高程进行划分,并根据式(1)构建 (x_i, y_i) 坐标对的曲线模型,进行多项式拟合;拟合曲线与 x - y 坐标轴围成的面积则为 Strahler 积分,即多项式在 $[0, 1]$ 区间求积分值——面积高程积分值 S ,其计算方法见式(2),用以表示流域地貌的侵蚀程度,判断流域地貌的发育阶段^[14]。

$$x_i = \frac{a_i}{A}, y_i = \frac{h_i}{H} \quad (1)$$

$$S = \int_0^1 f(x) dx \quad (2)$$

式中, a_i 表示流域内某一等高线以上面积, m^2 ; A 表示流域总面积, m^2 ; h_i 表示流域内某一等高线高程, m ; H 表示流域高差, m 。当 S 值 $> 60\%$ 、 $[35\%, 60\%]$ 和 $< 35\%$ 时分别表示流域侵蚀地貌发育演化阶段为幼龄期、壮龄期和老龄期^[14,16]。

流域地貌系统是内外营力共同作用的结果。Strahler 曲线是考虑外营力(如风化、侵蚀和搬运)作用下流域地貌演化的过程和阶段,它是一个封闭的地貌演化模型系统。实际上,流域地貌系统是开放的,还需要从内营力(如地壳运动、岩浆活动和地震)作用下考虑流域地貌演化的过程和阶段^[14]。因此,在 S 值的基础上又引入了地貌信息熵法^[14,16],从内营力作用的视角来判断流域地貌的发育阶段,其计算方法为

$$H(S) = S - 1 - \ln S \quad (3)$$

式中, $H(S)$ 为地貌信息熵值。当 $H(s) < 0.11$ 、 $[0.11, 0.40]$ 、 > 0.4 时,分别代表流域地貌发育阶段为幼龄期、壮龄期和老龄期。

3 结果与分析

3.1 基于盒分维方法的分维值 D_i 分析

从图 3 和图 5 可以看出,泥河沟流域和枣子沟

流域水系随网格边长 r 的增加,网格数目 $N(r)$ 呈下降趋势,且其下降速度由刚开始的急剧变为缓慢。 r - $N(r)$ 曲线拟合函数表明,二者之间存在非线性关系,其相关系数 R^2 值分别为 0.955 和 0.966,拟合程度较高;从水系 r - $N(r)$ 双对数图(图 4、图 6)可以看出,两者存在较强的线性相关关系,相关系数 R^2 值分别为 0.981 和 0.985,表明水系结构存在良好的分形特征。由表 1 中盒分维的表达公式计算可得泥河沟流域水系盒分维值 $D_i = 1.886$,枣子沟流域水系盒分维值 $D_i = 1.827$ 。这说明 2 个流域侵蚀地貌发育阶段皆为壮龄期,这一时期流域水土流失轻微,趋于较稳定的状态。

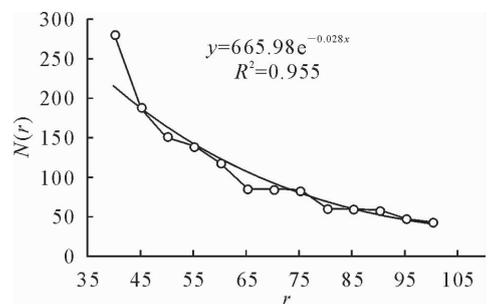


图3 泥河沟流域水系 r - $N(r)$ 关系

Fig. 3 Relationship between r - $N(r)$ in the drainage system of Nihegou catchment

3.2 基于 Horton 分维方法的分维值 D_h 分析

Horton 通过对大量自然水系资料分析得出自然水系平均分枝比介于 $3 \sim 5$, 平均长度比介于 $1.5 \sim 3$ 这一结论, $D \approx 1.14$ 。由表 2 可以看出,泥河沟流域平均长度比并不在 $1.5 \sim 3$, 平均分枝比在 $3 \sim 5$, 且基于 Horton 分维方法计算的泥河沟流域水系 Horton 分维值 $D_h = 1.48$ 。根据流域地貌发育阶段的判定,这说明泥河沟流域侵蚀地貌发育阶段为幼龄期。由表 3 可以看出,枣子沟流域平均长度比和平均分枝比均没有在 Horton 研究结论相应的

范围之内,表明枣子沟流域基于 Horton 分维方法计算的分维值是不准确的。这是由于 Horton 分维方法是基于矢量河流分级而言,在栅-矢转化的过程中会有河网水系信息的损失,进而导致 Horton 计算结果产生误差。这说明该方法的使用有一定的局限性。

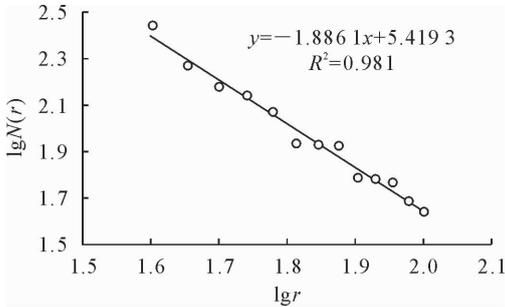


图 4 泥河流域水系 $\lg r - \lg N(r)$ 关系

Fig. 4 Relationship between $\lg r - \lg N(r)$ in the drainage system of Nihegou catchment

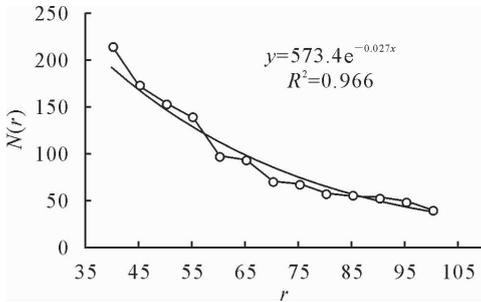


图 5 枣子沟流域水系 $r - N(r)$ 关系

Fig. 5 Relationship between $r - N(r)$ in the drainage system of Zaozigou catchment

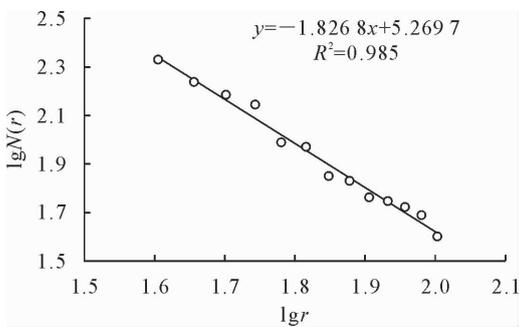


图 6 枣子沟流域水系 $\lg r - \lg N(r)$ 关系

Fig. 6 Relationship between $\lg r - \lg N(r)$ in the drainage system of Zaozigou catchment

很显然,盒分维方法和 Horton 分维方法对流域地貌发育阶段的判定结果并不一致,还需要进一步的验证。

3.3 验证分析

以 10 m 高程为间隔提取 DEM 等高线,计算统计了各高程为 h_i 等高线以上的面积 a_i ,参照式(1)对 $y_i - x_i$ 进行多项式拟合,得到 Strahler 曲线(图 7、图 8)。

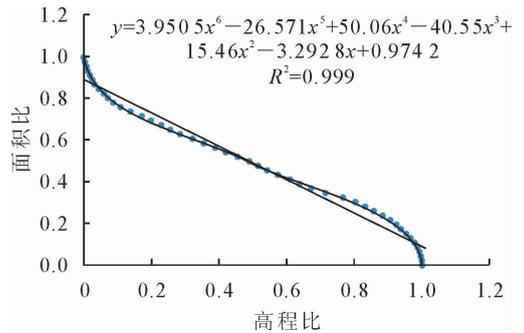


图 7 泥河流域地貌 Strahler 面积-高程曲线

Fig. 7 Strahler area-elevation curve of the Nihegou catchment

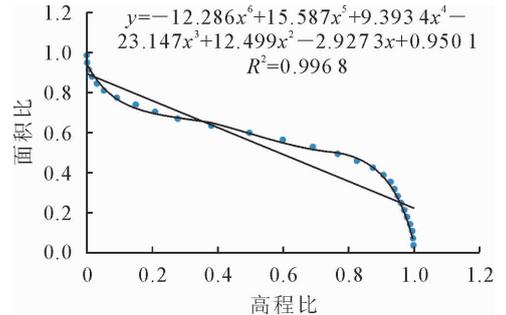


图 8 枣子沟流域地貌 Strahler 面积-高程曲线

Fig. 8 Strahler area-elevation curve of the Zaozigou catchment

由式(2)、式(3)计算求得泥河流域 S 值为 0.49, $H(S)$ 值为 0.2;枣子沟流域 S 值为 0.59, $H(S)$ 值为 0.12。说明泥河沟和枣子沟流域侵蚀地貌发育阶段皆为壮龄期,这与盒分维方法判识结果一致。

3.4 流域综合治理成效分析

一般来说,水系的复杂程度实质上反映了河网的调蓄作用^[4],水系分维越高,水系越复杂,河网调蓄能力越强;枯水季节河道水量能够得到及时补充,丰水季节河道水量能得到及时分流,生态环境抗干扰能力强,自然灾害发生的可能性也就越低。泥河沟和枣子沟流域地貌为壮龄期,说明其水系复杂程度适宜,河网调蓄作用适中,当前侵蚀状况趋于稳定,水土流失得到有效控制,生态敏感性整体上已处于较低水平,生态环境抗干扰能力增强并趋于更加稳定的状态。这与王紫薇等^[17-20]有关生态敏感性的研究结果相一致。对于生态环境的影响,自然规律占支配地位,而人类活动的影响较低,进一步说明泥河沟和枣子沟流域 20 a 的综合治理成效显著。

4 结论与讨论

泥河沟和枣子沟流域水系均具有良好分形结构特征。泥河沟流域和枣子沟流域水系盒分维值分别为 1.886 和 1.827,面积高程积分值分别为 0.49 和 0.59,地貌信息熵值分别为 0.2 和 0.12,侵蚀地貌发育阶段皆为壮龄期。泥河沟和枣子沟流域侵蚀水系复杂程度适宜,河网调蓄作用适中,流域当前侵蚀

表 2 泥河沟流域水系 Horton 分维值

Table 2 Horton fractal dimension of the drainage system in Nihegou catchment

河道级别	河道数目	河道平均长度	相邻两级河道分枝比	相邻两级河道长度比	相邻两级河道总数	相邻两级河道平均长度和	“第 4 项”×“第 6 项”	“第 5 项”×“第 7 项”	平均分枝比	平均长度比
1	17	0.45								
2	7	0.46	2.43	1.02	24	0.91	58.32	0.93		
3	7	0.87	1	1.89	14	1.33	14	2.51		
					38	2.24	72.32	3.44	1.9	1.54

表 3 枣子沟流域水系 Horton 分维值

Table 3 Horton fractal dimension of the drainage system in Zaozigou catchment

河道级别	河道数目	河道平均长度	相邻两级河道分枝比	相邻两级河道长度比	相邻两级河道总数	相邻两级河道平均长度和	“第 4 项”×“第 6 项”	“第 5 项”×“第 7 项”	平均分枝比	平均长度比
1	19	4.64								
2	8	4.09	2.38	0.88	27	8.73	64.26	7.68		
3	9	3.58	0.89	0.88	17	7.67	15.13	6.75		
					44	16.4	79.39	14.43	1.8	0.88

状况趋于稳定,可继续保持目前的自然修复状态。

较 Horton 分维方法,盒分维方法计算的水系分维值对流域侵蚀地貌发育阶段的判识具有更高的可靠性。

基于盒分维方法和 Horton 分维方法计算水系分维值,通过 2 种计算的方法比较以及面积高程积分和地貌信息熵的验证来判识流域侵蚀地貌发育阶段。研究表明,基于盒分维方法计算的水系分维值对流域侵蚀地貌发育阶段的判识具有更高的可靠性,该研究结果与 D. G. Tartobon 等^[6]的研究结果一致。盒分维方法是基于栅格河网计算而得,主要刻画河流的弯曲复杂程度^[21],其栅格水系河网信息保存较为完整,且该方法计算过程简单和物理意义明确而被广泛使用^[22]。Horton 分维方法是对矢量河流分级并统计相应分级下的水系河网数目所得,且矢量河流是由栅格水系河网转化而来,并在栅-矢转化的过程中难免会有信息的损失。因此,尽管 Horton 分维方法能够从一定程度上反映流域水系本身分枝形态的特征,但其前提条件是流域水系满足分形特征时结果才有一定可靠性,而完全符合这一条件的水系是比较少见的^[10]。

需要说明的是,汇流累积阈值和 DEM 分辨率对水系分维值的计算也会产生影响,进而影响流域侵蚀地貌发育阶段的判识。与此同时,除了河流水系外,流域侵蚀地貌发育阶段还受到降雨、地形和下垫面等因素的影响。本研究只分析了小流域范围内不同分维值计算方法之间的差异,没有考虑流域内其它因素的影响以及人为的干扰。因此,还应对流域内降雨、气温、地形特征以及人为活动等的影响进行研究。此外,对更多小流域尤其是西北内陆地区

的综合治理小流域进行地貌发育阶段判识分析,以期对西北地区生态环境的改善提供参考。

参考文献:

- [1] MANDELNBROT B B. How long is the coast of Britain? [J]. Science, 1967, 156 (3775): 636-638.
- [2] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124-128.
HE L H, ZHAO H. The fractal dimension of river networks and its interpretation[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16 (2): 124-128. (in Chinese)
- [3] 崔灵周,李占斌,肖学年. 岔巴沟流域地貌形态分形特征量化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 41-44.
CUI L Z, LI Z B, XIAO X N. Study on quantifying topographical fractal character of Chabagou watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 41-44. (in Chinese)
- [4] 马宗伟,许有鹏,钟善锦. 水系分形特征对流域径流特性的影响——以赣江中上游流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 163-169.
MA Z W, XU Y P, ZHONG S J. Influence of river network fractal characteristic on runoff——case study in the basin of upper and middle courses of Gan river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 163-169. (in Chinese)
- [5] LABARBERA P, ROSSO R. On the fractal dimension of stream networks[J]. Water Resources Research, 1989, 25(4): 735-741.
- [6] TARBOTON D G, BRAS R L, IGNACIO R I. The fractal nature of river networks[J]. Water Resources Research, 1988, 24 (8): 1317-1322.
- [7] 姜永清,邵明安,李占斌,等. 黄土高原流域水系的 HORTON 级比数和分形特性[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 206-211.
JIANG Y Q, SHAO M A, LI Z B, et al. Horton's order ratios of water course network of drainage basin and their fractal characters in the Loess Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(2): 206-211. (in Chinese)

- [4] 韦鹏练,秦志永,符韵林,等. 桉木阻燃胶合板胶合强度及润湿性研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 244-247.
WEI P L, QIN Z Y, FU Y L, *et al.* Bonding strength and wettability of *Eucalyptus* flame-retardant plywood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 244-247. (in Chinese)
- [5] 张上镇. 室外用涂料耐光性与耐候性研究[J]. 林产工业, 1994, 13(2): 275-294.
- [6] 段新芳,李坚,刘贵生,等. 红松木材透明涂饰涂膜耐光性的研究[J]. 吉林林学院学报, 1997, 13(3): 125-128.
DUAN X F, LI J, LIU G S, *et al.* Lightfastness of clear painted varnish film on the *Korean* pine wood[J]. Journal of Jilin Forestry University, 1997, 13(3): 125-128. (in Chinese)
- [7] 陆步云. 室外涂饰木材的抗老化性能[J]. 南京林业大学学报, 2007, 31(4): 61-64.
LU B Y. Research on anti-aging ability of exterior coated wood [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2007, 31(4): 61-64. (in Chinese)
- [8] 郭洪武,王金林,李春生. 水性透明涂料涂饰单板光变色的研究[J]. 林业科学, 2009, 45(5): 121-125.
GUO H W, WANG J L, LI C S. Study on the photochroma of coated veneer by water-borne clear prints[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(5): 121-125. (in Chinese)
- [9] 张毛毛. 人工加速老化条件下樟子松木材涂层失效行为初步研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [10] 刘一星,李坚,于晶,等. 透明涂饰前后木材表面材色和光泽度的变化[J]. 家具, 1995(3): 3-5.
- [11] 胡吉萍. 福建四种实木家具用材涂饰性能的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [12] 崔蒙蒙,吴智慧. 现代上蜡工艺对红木家具用木材材色及光泽的影响[J]. 涂料工业, 2017, 47(2): 67-72.
- [13] 刘一星,于海鹏. 透明涂饰对木材纹理等视觉特征的影响分析[J]. 林业科学, 2006, 42(12): 90-94.
LIU Y X, YU H P. Effect of clear lacquer on textural vision of wood surface [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(12): 90-94. (in Chinese)
- [14] 黎小波,龙涛,李秀荣,等. 观光木木材涂饰工艺研究[J]. 森林工程, 2013, 29(6): 62-65.
- [15] 李军伟. 家具聚氨酯漆透明涂饰工艺、常见缺陷及防治措施[J]. 木材加工机械, 2009(4): 37-40.
- [16] 于海鹏,刘一星,罗光华,等. 聚氨酯漆透明涂饰木材的视觉物理量变化规律[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4): 463-468.
- [17] 潘亚东,李春风. 三聚氰胺改性树脂涂饰薄木饰面板工艺研究[J]. 森林工程, 2017, 33(3): 44-47.
- [18] 侯新毅. 三种桉树木材的机械加工和透明涂饰性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [19] 梁善庆,彭立民. 木荷、鹅掌楸和银杏透明涂饰色度学参数变化研究[J]. 木材加工机械, 2014(4): 41-44.

(上接第 201 页)

- [8] 王小军,张强,易小兵,等. 灌区渠系特征与灌溉水利用系数的 Horton 分维[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 789-800.
WANG X J, ZHANG Q, YI X B, *et al.* Study on the horton fractal dimension with their rigationcanal system characteristics and effective utilization coefficient of irrigation water[J]. Geographical Research, 2014, 33(4): 789-800. (in Chinese)
- [9] 孙祝友,杜国云,朱大奎,等. 莱州湾东岸河流的分形特征与流域地貌发育研究[J]. 地理科学, 2010, 16(5): 755-759.
- [10] KIM J C, JUNG K. Fractal tree analysis of drainage patterns [J]. Water Resources Management, 2015, 29(4): 1217-1230.
- [11] 吴骏. 近 40 年泥河沟流域土壤养分时空变异及驱动因素研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2018.
- [12] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 郑楠炯,周买春,刘远. 基于 GIS 的 Horton 水系分维值估算——以韩江流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 81-85, 89.
- [14] 王玉成,董有福,和娟. 基于分形的小流域水系演化试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 17-20.
- [15] 任娟,杨武年,许娟. 基于 GIS 与 DEM 的岷江上游流域水系分维值计算[J]. 地理空间信息, 2015, 13(1): 77-79.
- [16] 艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1987(2): 1-8.
- [17] 王紫薇,黄文哲,周阳阳等. 泥河沟流域生态敏感性分析评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 210-215.
WANG Z W, HUANG W, ZHOU Y Y, *et al.* Integrated ecological sensitivity analysis and evaluation of Nihegou catchment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 210-215. (in Chinese)
- [18] 周雨露,杨永峰,袁伟影等. 基于 GIS 的济南小清河流域生态敏感性分析与评价[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 50-56, 62.
ZHOU Y L, YANG Y F, YUAN W Y, *et al.* Analysis and evaluation on ecological sensitivity of Xiaoqinghe river basin in Jinan based on GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University 2016, 31(3): 50-56, 62. (in Chinese)
- [19] 田鹏,田坤,李靖. 黑龙江流域生态功能区划研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 189-193.
- [20] 张博,吴发启,张正华. 泥河沟流域农林复合生态系统景观格局变化研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 5-8.
- [21] 李进林,韦杰,等. 嘉陵江流域水系形态特征与侵蚀产沙响应[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 7-13.
- [22] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等. 基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 141-144.