

黄河流域河网密度的空间特征及其影响因素

颜明, 许炯心, 贺莉, 王随继, 郑明国, 孙莉英, 裴亮

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 河网密度是表现流域流水地貌的重要指标, 研究河网密度有助于对流域整体水文地貌过程发展演化的理解。基于 30 m 分辨率全球数字高程模型数据, 利用 Archydro 模块, 在 ArcGIS 平台上提取了黄河流域花园口水文站以上的水系, 并计算出河网密度, 分析了黄河流域花园口水文站以上区域河网密度的空间分布, 并就地貌、降雨量和植被覆盖等因素分析了自然要素对流域河网密度的影响。研究发现: (1) 空间分布上, 从西北向东南先增加后略微减少。西北沙漠区的河网密度非常低, 高值区位于黄河中游的沙漠—黄土过渡区, 再向东南又有所减小, 西南区域的青藏高原由于海拔高, 落差大, 河网密度值也较高; (2) 统计结果显示黄河流域河网密度符合正态分布, 表明空间分布是多种因素综合作用的结果; (3) 河网密度主要受到地貌的控制, 在高差小于 1 000 m 和坡度 $\leq 9^\circ$ 时, 河网密度随落差和坡度增大而增大, 当它们进一步增加时, 河网密度有所减小。同时, 河网密度的空间分布与降雨量和植被的空间分布具有一定对应性, 随着降雨量和植被覆盖的增加, 河网密度逐渐增加, 但在超过一定的临界值后, 河网密度与降雨量和植被覆盖又表现出负相关, 负相关区域主要出现在东南部边缘。

关键词: 黄河流域; 河网密度; 空间特征; 影响因素

中图分类号: K928.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0288-05

Spatial Distribution and Its Influencing Factors of Drainage Density in the Yellow River Basin

YAN Ming, XU Jiongxin, HE Li, WANG Suiji, ZHENG Mingguo, SUN Liying, PEI Liang

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The drainage density (Dd) is an important index to show the fluvial geomorphology. The study on drainage density is helpful to understand evolution of the whole hydrological and geomorphic process. Based on ASTER 30 m Global Digital Elevation Model, drainage network of the Yellow River Basin is extracted using Archydro 1.1 and Dd is calculated. The spatial characteristics of Dd of the Yellow River are described, and the relations of Dd to its influencing factors, e. g. the topography, precipitation and vegetation coverage are built. The results shows that: (1) along the direction of northeast to southwest, the Yellow River could be divided into three zones, northwest of the Loess Plateau, the main-body of the Loess Plateau, the south-east of the Loess Plateau; the northwest zone and the southeast zone are mixed with high Dd and Low Dd, and the main-body of the Loess Plateau zone is the medium Dd area; (2) there is a non-linear relation between Dd and elevation differences (ED), Dd increases with ED to a maximum, then decreases; for the maximum Dd, the corresponding ED is 500 m; (3) the non-linear relation between Dd and S is similar to that of Dd to ED, and the S which is corresponding to the maximum Dd is 9° ; (4) the non-linear relations also existed between Dd to precipitation and Dd to NDVI, the corresponding values of precipitation and NDVI to the maximum of Dd are 500 mm and 0.3, respectively.

Keywords: Yellow River; drainage density; spatial distribution; influencing factors

河网密度(Dd)是指流域内单位面积上河流的总长度^[1-2], 是地貌^[3-5]、气候^[6-8]、土壤^[9-13]和植被^[14-15]等因素综合作用的结果, 经常用来表达河流被切割的

程度。自 Horton 提出河网密度这一概念之后, 许多研究者通过地形图测量不同地区的河网密度, 并分析了控制河网密度的因素, 取得了大量的研究成果。可

以说,河网密度与影响因素间的关系已经具有一定程度的认识,当前的河网密度取决于各种因素,包括气候和植被、土壤和岩石性质、地貌以及所处的地貌演化阶段。一些研究表明河网密度受相对地形影响,在湿润的荒芜地区,Schumm^[16]发现河网密度与地形比率(流域高程除以长度)存在正相关,Mosley^[17]做的一个沟道侵蚀的经验分析也表明河网密度与地表坡度存在正相关。气候和地质控制河网密度被广泛接受和理解^[5,9,12,18-19],河网密度在以下地区具有更高的值:干旱植被稀疏的地区;遭受强降雨的温带到热带地区;岩石覆盖的低渗透力和传导力地区。而且,河网密度和它的影响因素尤其是坡角更直接地对应于河道的演化阶段。这些研究发现都是在面积不超过100 km²范围内的小流域进行的,很少的研究工作将注意力放到大型流域上^[20],随着流域水文过程、地貌过程以及它们与人类活动之间的关系等方面研究的深入^[21-24],为了从更宏观的角度考虑流域的环境保护和水资源调配,大型流域研究工作受到越来越多的关注,需要综合性的指标来反映流域的现状,作为流域具有重要表征性指标的河网密度方面的研究需要继续发展^[25-26],尤其是复杂背景下大型流域内河网密度的总体表现及其连续变化的空间表现,以及这些表现的成因分析,对于流域水文地貌相关研究的深入具有重要意义。测量技术的发展以及计算设备的提高,利用高精度DEM提取水系并转化为河网密度变得更为便利,为大型流域河网密度的研究提供了技术支持,使得大型复杂流域的河网密度的空间特征研究成为可能。

为了分析大型流域河网密度的空间特征及主要控制因素对空间分布的影响,黄河流域花园口以上区域被选择作为研究区。主要针对以下两个方面开展研究:(1)研究区内河网密度在空间分布上的总体表现及区域性特征;(2)揭示地形、气候和植被覆盖等因素对河网密度的影响。

1 研究区概况

黄河是世界上著名的大型河流,总面积达750 000 km²,包括不同类型的地质、地貌和气候类型区。根据地质环境可以将黄河划分为3个区:(1)从河源到头道拐的上游区,河道长度3 471 km,覆盖面积385 996 km²,高度从河源的4 500 m下降到头道拐的1 000 m,河道穿梭于崇山峻岭,落差较大;(2)头道拐至花园口的中游区,河道长度1 206 km,集水面积343 751 km²,高度从1 000 m降到110 m,坡度相对连续;(3)从花园口经过河南省和山东省冲积平原到河口的下游

区,河道长度786 km,集水面积22 726 km^{2[27]}。下游河道大部分已经被河堤约束,因此,本研究的研究区不包括下游区域,仅选择花园口水文站以上区域(95°53′—113°54′E,32°9′—41°50′N)(图1)。

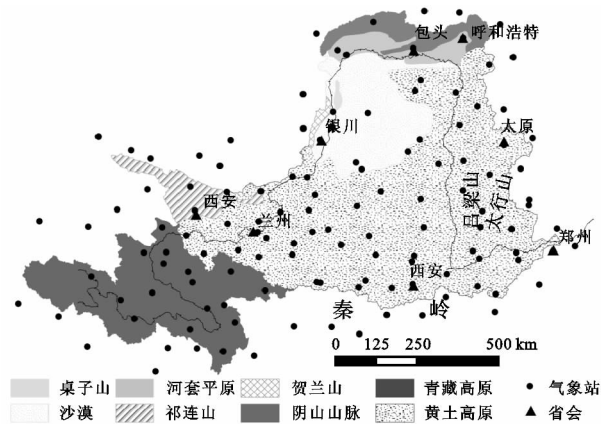


图1 研究区的位置及地质分区

研究区大部分处于温带半干旱区,年平均降雨量150~800 mm。平均降雨量的空间分布表明上游和中游分别位于干旱和半干旱区。这些气候区的变化与流域的地质环境具有对应关系,气候变化的季节性明显,冬季冷干且降雨量少,夏季湿润温暖并集中了全年的大部分降雨,夏季降雨占到了全年的85%。除了上游冰雪覆盖区之外,降雨是河水的主要来源^[28]。黄河流域植物种类繁多,按中国植被区域划分来看,研究区包含3个主要的植被区:青藏高原高寒植被区、西北及中部的温带草原带和东南的落叶阔叶林带。

2 数据来源及处理

本研究中使用3类数据:先进星载热发射和反射辐射计全球数字高程模型(ASTER GDEM)、降雨量和归一化植被指数(NDVI)。从中国国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/>)下载了美国航空航天局测量的研究区的118幅30 m分辨率ASTER GDEM数据,拼接所有的DEM为完整的研究区图幅,利用ArcGIS平台上的水文插件Archydro模块进行河网提取,首先对DEM进行填洼处理,使其成为具有水文意义的DEM,然后根据D8算法计算水流的方向^[29],最后生成水系。提取时,由于受数据精度限制,发现设置过低的最小积水面积阈值会产生很多实际不存在的平行线,设置的值过高时提取的水系有限,将提取的河网与遥感影像叠加,同时,也考虑到研究区面积较大,为便于计算,提取时最小面积的阈值设置为0.2 km²。提取后,与遥感影像对比,发现沙漠、冲积平原和河谷等区域提取出了许多实际不存在的水系,依据2002年增强的遥感影像(ETM),通过人工方式将不存在的线逐一删除,然后

在 ArcGIS 中利用线性密度计算工具 (Line Density) 将水系转化为河网密度。

从中国气象中心建设的中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>) 下载了研究区及周边 128 个气象站记录的年降雨量数据, 时间段为 1958—2007 年, 对每年的降雨量进行空间插值获得逐年的降雨空间分布图, 然后取所有年份的算术平均值, 插值时采用 Kriging 方法。除了地形和降雨量对河网密度的影响外, 植被覆盖也是本研究重点关注的因素。这里采用了来自于美国航空航天局 (NASA) 合成的归一化植被指数 (NDVI) 数据集, 时间段为 1981—2003 年, 这里取 1981—2003 年的多年算术平均值。

由于研究区覆盖范围广, 栅格数量多, 为便于统计分析不同要素对河网密度的影响, 将花园口水文站以上的黄河流域划分成 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 的单元格, 经检测, 20 km^2 比较适合大型山地, 过大或过小都无法很好地表现出地形的高差, 按照这一网格标准将研究区分为 1 834 个单元格, 计算每个单元格的平均河网密度。对于河网密度的影响因素, 也用同样大小的单元格进行提取, 高差为每个 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 单元格内最大高程值减去最小高程值, 坡度、降雨量和 NDVI 取的是 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 单元格内所有像元的算术平均值。

3 结果与分析

3.1 河网密度的空间特征

根据 30 m 分辨率的 DEM 制作的黄河流域河网密度图具有明显的区域特征: 空间变化上来说, 河网密度从西北向东南先明显增加后略微减少, 可以划分为 3 个主要的区域: 沙漠低值区、黄土高原中高值区和山地高值区、汾渭盆地低值区及花园口附近低值区。沙漠位于研究区的西北, 包括库布齐沙漠、毛乌苏沙地、河东沙地, 由于被沙丘覆盖, 大部分区域没有形成水系, 河网密度值为零, 仅在个别区域有简单水系, 如库布齐沙漠东部发育有十大孔兑, 以及黄河流域中游右岸的上游河源区, 这些水系较为简单, 仅有干流和极少的一级支流, 河网密度较低。而另一类河网密度较低的区域是平原和盆地, 包括河套平原、汾河盆地和渭河盆地, 现今这些区域大部分已变成农田, 只留下一些残存的古河道。黄土高原因其松散易蚀的千沟万壑著称, 具有较高的河网密度, 河网密度值介于 $1 \sim 3\text{ km/km}^2$ (图 2), 由于本次提取的精度有限, 未能体现出黄土高原不同丘陵区间差异^[20], 实际的河网密度高许多。研究区内山地较多, 这些区域同样具有较高的河网密度, 大于 3 km/km^2 的主要分

布在这些山区, 包括植被覆盖较低的阴山和贺兰山, 更为稠密的区域在山西省北部的山谷里, 秦岭山脉东部以及黄河青铜峡水库以上山区。

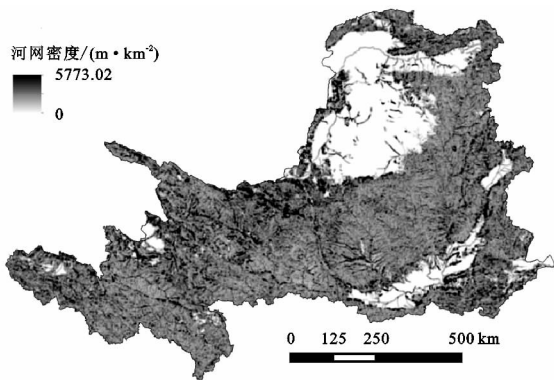


图 2 黄河流域河网密度空间分布

3.2 不同自然因素对河网密度的影响

河网密度统计结果表明: 除不存在水系的区域外, 大部分区域的河网密度值为 $1 \sim 2\text{ km/km}^2$ (图 3), 统计显示为正态分布, 正态分布系数为 1.69, 标准偏差 0.33, 坡度曲率为 1.63, 峰态的标准偏差为 0.656。这些统计结果表明: 黄河流域的河网密度的分布符合正态分布规律, 正态分布都不是单一因素作用的结果, 往往受多种因素的综合作用所致, 由于黄河流域覆盖范围广, 具有多种类型的地质地貌、气候和植被等条件, 它们的共同作用使得黄河流域的河网密度呈现正态分布形态, 该形态与 Langbein-Schumm 定律的形态基本一致, 其形成机理也可以用该定律来解释。

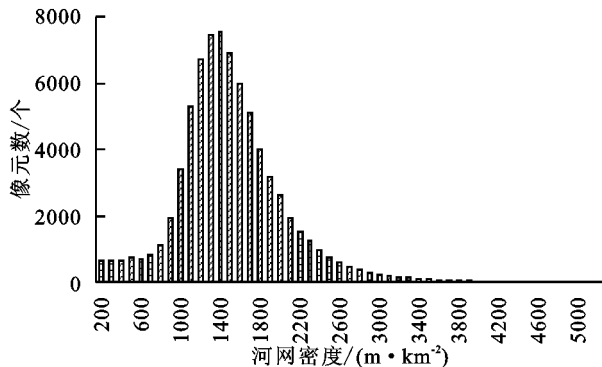


图 3 基于像元的河网密度统计

3.2.1 地貌对河网密度的影响 河网密度随着两个地形指标 (高差和坡度) 的变化都是先增大后无明显变化。相关分析显示: 河网密度与高差和坡度之间都表现出正相关, Pearson 相关系数分别为 0.429, 0.48, 它们的显著性水平都超过 0.001。高差从 0 m 增加到 500 m, 河网密度快速的增加, 高差进一步增加时, 河网密度略微有所增加, 当高差大于 1 000 m 以后, 河网密度维持在一个较高的水平, 但没有表现出明显的变化趋势 (图 4)。从地貌角度来看, 河网密度快速上升的区域主要跨越在平原与低山之间, 而在中山和高

山上,河网密度没有随高差表现出明显的变化。

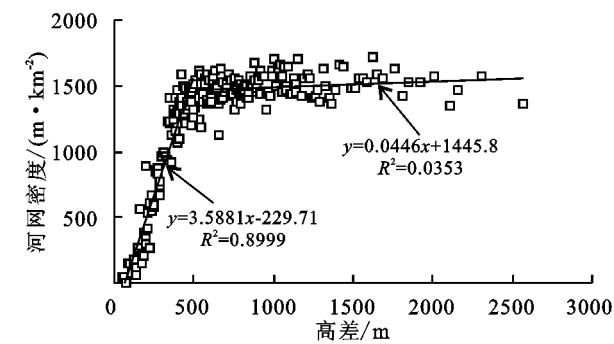


图 4 河网密度随高差的变化

坡度是决定河网密度的又一个基本条件,水系提取的基本依据就是坡度,因而河网密度的大小与坡度之间存在必然的联系。当坡度从 0°增加到 9°,河网密度表现出增加趋势,这些区域主要分布在平原向山地转变的过渡区域;当坡度>9°时,河网密度随坡度增加表现出略微减少的趋势,但河网密度的值总体水平较高,说明坡度越大,发育出越密集水系的概率越高。坡度>9°的区域分布较广,包括黄土高原和青藏高原的大部分区域,以及阴山山脉和贺兰山山脉(图 5)。河网密度与地形的相关分析表明河网密度在坡度和高差处于较低时具有更大的变化。当高差较大时,河网密度在 1~2.5 km/km² 范围内变动,说明在地形较低的区域河网密度更容易受到其他因素的影响,而在更为陡峻的地区地形可能起到主导作用。

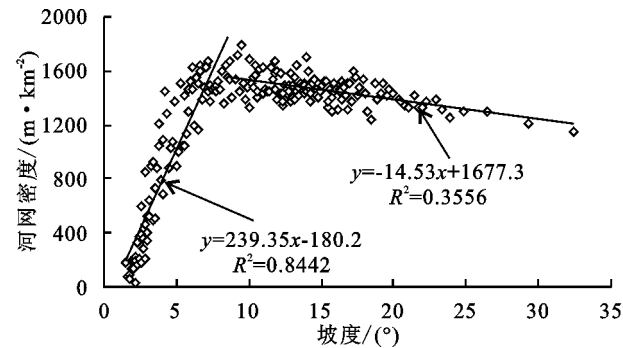


图 5 河网密度随坡度的变化

3.2.2 降雨量对河网密度的影响 河网密度与降雨量之间的关系曲线不是单调变化(图 6)。可以划分为两个部分:(1) 当降雨量≤500 mm 时,河网密度随着降雨量的增加而增加,这表明:在干旱半干旱地区,对于植被稀少导致地表缺乏防护力的地区来说,降雨越多的区域发育的水系越多。(2) 降雨量在 500~800 mm 时,河网密度与降雨量呈现出负相关,随着降雨量的增加,河网密度略微的减少,尽管侵蚀力在东南边的更强,河网密度却具有相反的变化。这些区域刚好是植被覆盖条件较好,且地表物质由更细的、粘性更高的黄土组成,地表植被的缓冲和土壤抗蚀力

的增加都部分削弱了径流的冲刷,使得东南区域的河网密度有所减小。

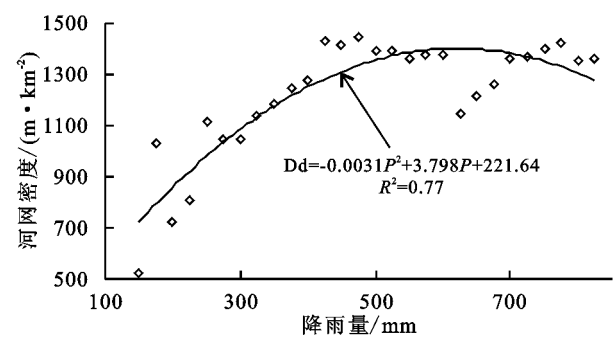


图 6 河网密度随着降雨量变化的关系曲线

3.2.3 河网密度与植被覆盖的相关性分析 河网密度随着 NDVI 的变化类似于河网密度与降雨量的变化:先增大后略微减小。同样可以分为两个部分:(1) 当 NDVI 值介于 0.079~0.3 时,随着 NDVI 的增加,河网密度逐渐增加;(2) 当 NDVI 进一步增加时,河网密度略微减少(图 7)。趋势线表明:在干旱、半干旱区,植被对地表的保护能力是非常有限的,稀疏草原、灌丛和针叶林对土壤的保护力是非常弱的。当植被变为落叶阔叶林时,即使遭遇强大的夏季暴雨,地表也能得到一定的保护。这个变化与河网密度随着降雨量变化具有一定的同步性,这主要是植被覆盖的好坏与降雨量的多寡的内在关联所致。

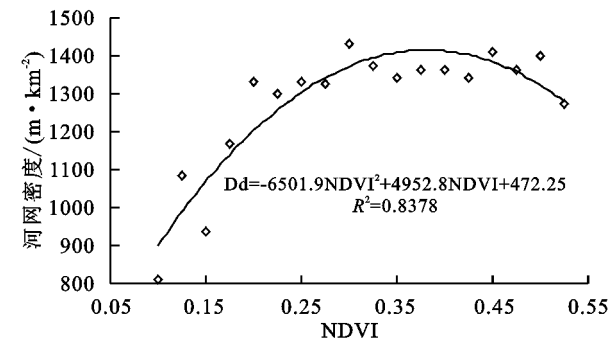


图 7 河网密度随 NDVI 变化的关系曲线

4 讨论与结论

正如前人提及,河网密度受到各种因素的控制,是各种因素综合作用的结果。通过对黄河流域河网密度的分析,我们认为这些因素在水系的发育上所起作用存在差异。我国的地形格局对于黄河流域的河网密度起着主导作用,具有一定高差的地形是地表物质移动的一个先决条件,地形对于河流发展和演化模式具有决定性意义。从全流域来看,高差和坡度的配合成为水系发展的关键性因素,高差和坡度使物质运动成为可能,也就是高差和坡度等决定了河网密度最基本的发育条件。降雨和融雪形成的径流是主要的侵蚀动力,仅仅当具有一定的高差和坡度时,地表水

流能携带物质输出流域,所有的其他因素的影响都是基于地形和水动力这两个前提,而其他因素,诸如植被覆盖和土壤物理性质等,会进一步起到促进或者遏制的的作用,植被稀疏且土壤松散的区域可能产生比较密集的水系,如果渗透力过高,又会降低水系的形成能力。总的来说,黄河流域河网密度的空间特征是受地形这一非地带性因素控制的,同时,又受到降雨、土壤和植被覆盖等地带性因素的影响。各要素对于水系的影响也不仅仅是简单的主次关系,影响因素之间还存在一定的交叉关系,如高差较大的区域通常坡度也较大,降雨多的区域具有较强的侵蚀动能,但由于雨水充足,植被的覆盖比例也会明显提高,起到保护地表遭受侵蚀的作用,使得水系的发育受到约束,如何对这些要素的叠加效应进行区分还有待后续工作深入。总之,黄河流域河网密度具有明显的空间差异,受到多种因素控制,控制要素间存在一定的主次关系,又发生了一定的交叉作用,共同作用于河网的发育。

基于 30 m 分辨率的 DEM 提取了黄河流域的水系,并转化成河网密度图进行了空间分析,并分析了几个主要自然因素对河网密度的影响。研究结果表明:黄河流域花园口水文站以上区域的河网密度从西北向东南先显著增加后略微减少;利用相关分析法分析了河网密度与地貌、降雨量和植被覆盖等影响因素的关系,结果表明地形是主要的控制要素,当坡度 $<9^{\circ}$ 、相对高差 <1000 m 时,河网密度表现出增加趋势,当它们进一步增加时,河网密度没有出现明显变化。河网密度与降雨量和植被覆盖在空间上具有对应性,在干旱区、半干旱区,降雨量和 NDVI 与河网密度间存在正相关关系,当降雨量和植被覆盖进一步增加时,也就是靠近湿润区边缘时,河网密度与这两者表现出负相关关系。

参考文献:

- [1] Horton R E. Drainage-basin characteristics[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1932, 13 (1):350-361.
- [2] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1945, 56(3):275-370.
- [3] Montgomery D R, Dietrich W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. Water Resources Research, 1994, 30(4):1153-1171.
- [4] Tucker G E, Bras R L. Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology [J]. Water Resources Research, 1998, 34(10):2751-2764.
- [5] Chorley R J. Climate and morphometry[J]. The Journal of Geology, 1957, 65(6):628-638.
- [6] Melton M A. Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents[J]. The Journal of Geology, 1958, 66(4):442-460.
- [7] Gregory K J, Gardiner V. Drainage density and climate[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1975, 19(3):287-298.
- [8] Moglen G E, Eltahir E A B, Bras R L. On the sensitivity of drainage density to climate change[J]. Water Resources Research, 1998, 34(4):855-862.
- [9] Smith K G. Erosional processes and landforms in badlands national monument, South Dakota[J]. Geological Society of America Bulletin, 1958, 69(8):975-1008.
- [10] Carlston C W. Drainage Density and Streamflow[M]. Washington D C: US Government Printing Office, 1963.
- [11] Cotton C A. The control of drainage density[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1964, 7 (2):348-352.
- [12] Wilson L. Drainage density, length ratios, and lithology in a glaciated area of southern Connecticut[J]. Geological Society of America Bulletin, 1971, 82 (10): 2955-2956.
- [13] Kelson K I, Wells S G. Geologic influences on fluvial hydrology and bedload transport in small mountainous watersheds, northern New Mexico, USA[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(8):671-690.
- [14] Schumm S A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey[J]. Geological Society of America bulletin, 1956, 67(5):597-646.
- [15] Oguchi T. Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(2):107-120.
- [16] Schumm S A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey[J]. Geological Society of America Bulletin, 1956, 67(5):597-646.
- [17] Mosley M P. An experimental study of rill erosion [J]. Transactions of Asae, 1974, 17(5):909-916.
- [18] Chorley R J, Morgan M A. Comparison of morphometric features, Unaka Mountains, Tennessee and North Carolina, and Dartmoor, England[J]. Geological Society of America Bulletin, 1962, 73(1):17-34.
- [19] Lin Z, Oguchi T. Drainage density, slope angle, and relative basin position in Japanese bare lands from high-resolution DEMs[J]. Geomorphology, 2004, 63 (3):159-173.
- [20] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6 (4):340-347.
- [21] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.

参考文献:

[1] 龙健,邓启琼,江新荣,等. 贵州喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤质量恢复能力的影响[J]. 生态学报, 2005,25(12):3188-3195.

[2] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002.

[3] 国家林业局防治荒漠化管理中心,国家林业局中南林业调查规划设计院. 石漠化综合治理模式[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[4] 熊康宁,陈永毕,陈起伟,等. 点石成金:贵州石漠化防治技术与模式[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2011.

[5] 曹建华,袁道先,童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学,2008(9):40-50.

[6] 庞世龙,欧芷阳,申文辉,等. 广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J]. 中南林业科技大学学报,2016,36(7):60-66.

[7] 钟杰,蒋新革,吴立潮,等. 石漠化演替过程中土壤肥力质量综合评价[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(7):56-61.

[8] 孙泉忠. 贵州省石漠化综合治理人工种草土壤肥力综合评价[J]. 贵州农业科学,2015,43(9):94-97.

[9] 王建锋. 重庆石漠化丘陵区耕层土壤养分空间变异性研究及肥力综合评价[D]. 重庆:西南大学,2010.

[10] 舒英格,何腾兵,高雪,等. 喀斯特山区县域耕地土壤养分综合评价[J]. 贵州农业科学,2009(8):112-115.

[11] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.

[12] 熊平生,袁道先,谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶,2010,29(4):355-362.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版

社,2000.

[14] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of American, Inc, 1994.

[15] 李婕玲,李朝婵,胡继伟,等. 典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J]. 水土保持研究,2017,24(1):54-59.

[16] 王建国,杨林章,单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):176-183.

[17] 周玮,周运超. 花江峡谷喀斯特区土壤质量两种定量评价方法研究[J]. 中国岩溶,2009,28(3):313-318.

[18] 司彬,姚小华,任华东,等. 黔中喀斯特植被恢复演替过程中土壤理化性质研究[J]. 江西农业大学学报,2008,30(6):1122-1125.

[19] 杨吉华,张永涛,高祥伟,等. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究[J]. 水土保持研究,2001,8(3):2-5,54.

[20] 张伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1459-1463.

[21] 周涛,戴全厚,吴秀芹,等. 喀斯特山区退耕还林地土壤养分效应及评价[J]. 水土保持研究,2011,18(6):71-74.

[22] 王济,蔡雄飞,雷丽,等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶,2010,29(1):1-5.

[23] 盛茂银,刘洋,熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报,2013,33(19):6303-6313.

[24] 杨苏茂,熊康宁,喻阳华,等. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整[J]. 世界林业研究,2017,30(3):91-96.

[25] 廖洪凯,龙健,李娟,等. 花椒(*Zanthoxylum bungeamun*)种植对喀斯特山区土壤水稳性团聚体分布及有机碳周转的影响[J]. 生态学杂志,2015(1):106-113.

(上接第 292 页)

[22] 刘家宏,王光谦,李铁健. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展,2006,17(2):186-195.

[23] 陈玉林,韩家田. 半干旱地区洪水预报的若干问题[J]. 水科学进展,2003,14(5):612-616.

[24] 王万忠,焦菊英,郝小品. 黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J]. 水科学进展,1999,10(2):165-169.

[25] Ariza-Villaverde A B, Jiménez-Hornero F J, Ravé E G D. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis [J]. Geomorphology, 2015,241:243-254.

[26] 师长兴,周园园,范小黎,等. 利用 DEM 进行黄河中游

河网提取及河网密度空间差异分析[J]. 测绘通报, 2012(10):24-27.

[27] Bandara C M M. Drainage density and effective precipitation [J]. Journal of Hydrology, 1974,21(2):187-190.

[28] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe(Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007,57(3):331-354.

[29] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984,28(3): 323-344.