

流域水系地貌定律的适应性与异质性研究

李发文,刘慧婉,仇昊雨,彭诗涵

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室,天津 300072)

摘要:利用 ArcGIS 提取不同空间尺度的水系资料,对 Horton 定律和 Hack 定律在黄河、淮河、海河和长江流域的适应性和异质性进行了研究并提出了 7 类地貌单元的分支比和长度比参数的推荐值。结果表明:Horton 定律的对数回归拟合相关系数普遍在 0.9 以上,Hack 定律的双对数回归拟合相关系数也在 0.6 以上,两大定律在不同地貌具有良好的适应性;除大通河、沁丹河和信江等个别流域外,流域分支比均为 3~5,长度比均为 1.5~3.0,且不同地貌发育阶段的霍顿比呈显著梯度递减趋势,不同地貌单元的霍顿比也呈一定梯度分布,不同地貌单元的霍顿比分布相似度高,各流域水系具有很大自相似性;两大定律在水系地貌方面具有显著的空间异质性,霍顿比在空间上呈现随机正态分布,其空间自相关性不明显;高原区、高山区、高原-中低山过渡区、中低山老年期区、中低山壮年期区、丘陵区、平原区等 7 类地貌单元的分支比推荐值分别为 4.58、4.02、4.34、4.50、4.02、4.25、4.20,长度比推荐值分别为 2.66、2.28、2.22、2.28、2.23、2.26、2.12。

关键词:DEM;河网提取;Horton 定律;Hack 定律;地统计;聚类分析;流域水文响应;水系地貌

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0019-11

Study on adaptability and heterogeneity of water system geomorphic laws in watersheds//LI Fawen, LIU Huiwan, QIU Haoyu, PENG Shihan(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Using ArcGIS to extract water system data at different spatial scales, the adaptability and heterogeneity of Horton's law and Hack's law in the Yellow River, Huaihe River, Haihe River, and Yangtze River basins was investigated, and recommended values for branch ratio and length ratio parameters for seven types of geomorphic units were proposed. The results show that the logarithmic regression fitting correlation coefficient of Horton's law is generally above 0.9, and the double logarithmic regression fitting correlation coefficient of Hack's law is also above 0.6, indicating that the two laws have good adaptability in different landforms. Except for a few watersheds such as Datong River, Qindan River, and Xinjiang River, the branch ratio of each watershed is 3 to 5, and the length ratio is 1.5 to 3.0. Moreover, the Horton ratio of different geomorphic development stages shows a significant gradient decreasing trend, and the Horton ratio of different geomorphic units also exhibits a certain gradient distribution. The distribution similarity of Horton ratio of different geomorphic units is high, and the water systems in each watershed have great self-similarity. The two laws have significant spatial heterogeneity in water system geomorphology, with the Horton ratio exhibiting a random normal distribution in space and no obvious spatial autocorrelation. The reference values for branch ratios in seven geomorphic regions, including plateau area, high mountain area, plateau middle low mountain transition area, middle low mountain elderly area, middle low mountain middle-aged area, hilly area, and plain area, are 4.58, 4.02, 4.34, 4.50, 4.02, 4.25, and 4.20, respectively, and the reference values for length ratios are 2.66, 2.28, 2.22, 2.28, 2.23, 2.26, and 2.12, respectively.

Key words: DEM; river network extraction; Horton's law; Hack's law; geostatistics; clustering analysis; hydrological response of watershed; water system geomorphology

我国水资源时空分布不均,而水系作为水资源的物理载体,其空间格局决定着水资源的空间分配。水系格局是指流域内的河流、湖泊、人工渠道等各种

水体形成的排水模式及其展布,水系类型多种多样,包括树枝状、平行状、矩形状、扇状、网状、向心状、混合状等^[1]。而流域地形地貌作为地球系统中活跃

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006601);国家自然科学基金项目(52239004)
作者简介:李发文(1976—),男,教授,博士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:lifawen@tju.edu.cn
通信作者:刘慧婉(2001—),女,硕士研究生,主要从事水文学水资源研究。E-mail:liuhuiwan317@163.com

的物质与能量载体之一,极大地制约了水系的分布。长久以来,通过研究水系与地貌间的定量关系,从水系地貌学角度寻找水系地貌参数规律,来推求水文过程特征,减少对水文资料的依赖性,是水文学家长期追求的目标。因此,深入探索水系结构规律、并运用地学规律进行定量描述具有重要意义。

定量描述水系结构特征是深入探索水系结构规律的必要条件^[2],找到特征尺度是定量描述水系特征的基础,而天然水系具有不可微分性、自相似性等特点,空间和等级结构不存在特征尺度,不能进行几何描述,因此对水系结构特征进行数字化描述仍十分困难,尚未形成一定标准。1945 年美国地质学家霍顿提出著名的 Horton 定律,认为自然河流的水系结构组成具有自相似性。1957 年 Hack 提出的 Hack 定律,指出干流长度与流域面积存在幂函数关系。这些定律目前被广泛应用于河流水系结构研究,并不断受到学者们的分析与验证^[3]。陈彦光等^[4]重建 Horton 定律模型,验证了 Hack 定律可以由 Horton 第二、三定律导出,是一个异速生长模型。刘怀湘等^[5]研究发现绝大多数天然水系存在近似于 Horton 定律所反映的线性规律,即天然水系霍顿比处于较窄的变化范围,如分支比为 3~5,长度比为 1.5~3.0,面积比为 3~6。在 Horton-Strahler 分级体系的基础上,Tokunaga 引入表征河流入汇关系的侧枝比来展示水系拓扑结构的自相似性^[6]。这些定律揭示了水系结构特征与流域特征的自相关性,便于推测河系结构或快速推测流域的干流长度。

在地理学领域,一系列定律强调了地理事物空间上的相似性和异质性。1970 年,Tobler^[7]提出了地理学第一定律,强调了地理事物空间上的相似性。该定律表述为:任何事物都与其他事物是相关的,但距离近的事物之间的相关性比距离远的事物之间的相关性更强。1989 年,Anselin^[8]提出空间异质性,Goodchild^[9]将其作为地理学第二定律。Zhu 等^[10]提出了地理学第三定律:地理环境越相似,则地理特征越相近。其发现可通过构建相似的地理环境对未知地区的地理特征进行预测,预测结果十分理想,这为地貌定律的运用提供了新的思路和方向。

综合考虑地理事物空间上的相似性和异质性,对水系定律进行适应性和异质性研究,并通过聚类构造相似地理环境,总结归纳不同地貌区的结构参数推荐值,可对缺乏资料地区的水文研究提供一定的参考。然而,目前研究更多集中于对水系结构的解析,鲜有对地貌定律进行深入探讨。本文依托流域数字高程模型(digital elevation model, DEM),在 ArcGIS 软件中提取不同空间尺度的流域数字化水

系资料。在此基础上细分归类多种地貌样本,对水系特征指标进行回归拟合分析,验证水系是否具有自相似性,即研究水系定律的适应情况;综合经典统计、地统计和冷热点分析方法研究其空间异质性,即分析水系定律的异质性。最后通过聚类算法识别构建相似的地貌环境,提出 7 类地貌单元的分支比和长度比参数推荐值。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域、淮河流域、海河流域和长江流域位于 23°N~43°N、90°E~125°E(图 1)。四大流域总面积约为 341.8 万 km²,占我国领土面积的 32.8%,其中,黄河干流全长约 5 464 km,淮河干流全长约 1 000 km,海河干流全长约 73 km,长江干流全长约 6 300 km。四大流域地域辽阔、地势复杂,地貌单元包括青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、云贵高原、横断山脉、四川盆地、江南丘陵、黄淮海平原、长江中下游平原。其气候条件复杂多变,整体属于大陆季风性气候。流域内降水的空间分布不均匀,年平均降水量从东南沿海地区的 1 000 mm 左右减少到西北地区的 400 mm 以下。

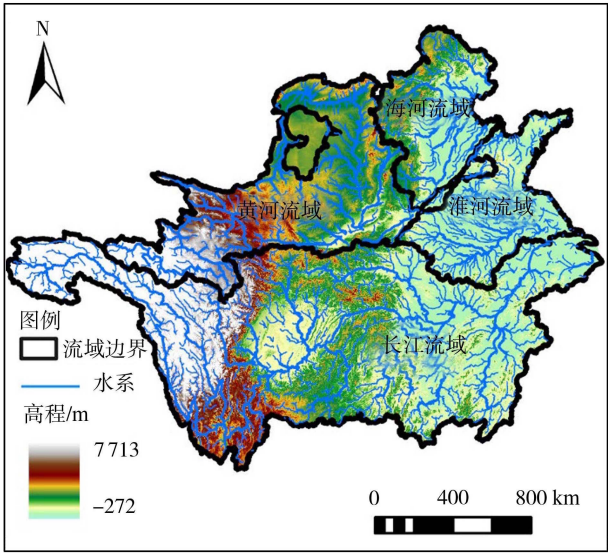


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of research area

1.2 数据来源

高程数据来自地理空间数据云中的 ASTERGDEM 数据,水平格网分辨率为 30 m。(<https://www.gscloud.cn/sources/index?pid=1&rootid=1>)。中国三级流域的划分矢量数据来自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心。(<https://www.resdc.cn/DataList1.aspx?>

2 研究方法

2.1 地貌定律

自相似性指目标整体与局部在形态结构及要素信息等方面具有一定的相似性,在进行缩放操作时,目标整体结构保持不变的特性。河系自相似性是地理学第一和第三定律在水系上的表征。河系具有多种形态的分支结构,是典型的具有分形特征的地理要素。Horton 定律和 Hack 定律所揭示的自相似关系,为定量描述具有显著分形特征的河系提供方法,是研究河系几何结构特征常用的规律。

a. Horton 定律。Horton 定律认为同一水系中,河流的流域面积、平均长度、数目与河流级别存在一定的关系。基于 Strahler 分级法,Horton 定律体现在数目律公式(式(1))和长度律公式(式(2))中。

$$R_B = N_{k-1} / N_k \quad (1)$$

$$R_L = L_k / L_{k-1} \quad (2)$$

式中: R_B 为分支比; k 为河道级别; N_{k-1} 、 N_k 分别为 $k-1$ 和 k 级的河道条数; R_L 为长度比; L_k 、 L_{k-1} 分别为 k 和 $k-1$ 级的河流平均长度。

b. Hack 定律。Hack 定律认为流域的干流长度与面积存在一定的幂函数关系:

$$L \sim A^b \quad (3)$$

式中: L 为流域干流长度; A 为流域面积; b 为幂指数。

如果流域的几何形状保持相似,则流域干流长度 L 应与流域面积 A 的 0.5 次方成正比。但实际河网往往不能绝对相似,其中幂指数 b 的一般范围大致在 0.57~0.6^[11-12]。 b 会随区域有轻微的变化,若是在较大的流域(大于 20 720 km²),也会略微降低。Hack 定律认为, b 超过 0.5 时,流域会随着面积的增加而变得细长^[13]。

2.2 区域样本归类

地形因素显著影响着水系结构和发育,坡度和平均高程是重要的地形参数^[13-14]。本文参考沈玉昌^[15]提出的地貌区划分类方案和中国地势图,以平均高程($\bar{H}$) 500、1 000、3 000 m 为临界值,辅以平均坡度($\bar{S}$)将子流域归类为高山高原区、中低山区、丘陵区和平原区等 4 类不同地形样本。为更详细分类刻画流域地貌,本文基于 Davis 提出的地貌发育规律,参考何隆华等^[16]于 1996 年提出的地貌发育阶段区分规律,以水系的分维 D 的 3 个界限值 1.6、1.89 和 2.0,将流域的侵蚀地貌发育划分为幼年期、壮年期及老年期 3 个阶段。最终得到了 12 类不同

地貌单元。

a. 平均坡度 $\bar{S}$ 。先利用公式(4)计算得到栅格坡度,再通过自然裂点法重分类栅格坡度得到流域的平均坡度。

$$R = \frac{\Delta H}{L_b} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R 为栅格坡度; ΔH 为栅格高程差; L_b 为水平距离。

b. 平均高程 $\bar{H}$ 。其计算公式为

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^N H_i / N \quad (5)$$

式中: N 为栅格数量; H_i 为第 i 栅格的高程。

c. 分维 D 。目前分维计算方法普遍采用基于 Horton 定律的方法或网格覆盖法(计盒法)。经计算发现,霍顿分维比何隆华等^[16]提出的规律适配性更好,故本文采用霍顿分维,计算公式^[17]为

$$D = \min(2, \lg R_B / \lg R_L) \quad (6)$$

2.3 适应性分析

利用回归拟合法^[18]确定 Horton 定律和 Hack 定律的结构指标时,要先使用最小二乘法拟合 k - $\lg N_k$ 曲线。斜率即为分支比 R_B ,通过同样的方法可以得到长度比 R_L 。通过相关系数 R^2 评估两大定律的拟合程度,从而评估两大定律的适用性^[19],并结合箱型图分析霍顿结构指标的分布情况。箱型图可以展示结构指标的中位数、上下四分位数以及异常值,从而验证水系结构自相似性。若两大地貌定律所揭示的水系自相似性得到验证,可认为地貌定律在不同地貌单元都具有良好适应性。

线性回归方程最小二乘拟合公式及相关系数计算公式为

$$Y = mX + b \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

其中

$$m = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

式中: Y 为目标变量; m 为斜率; X 为自变量; b 为截距,可由待定系数法求得; X_i 、 Y_i 为第 i 对观测值; n 为样本数量; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 为分别 X_i 、 Y_i 的均值; R^2 为拟合相关系数, R^2 值越接近于 1,则拟合效果越好。

2.4 异质性分析

通过对分支比、长度比和分维等特征指标统计分析,研究水系地貌定律的异质性。由于经典统计学分析只能在一定程度上反映样本总体,不能准确

反映样本特征指标的随机性、结构性与相关性。因此辅以地统计和冷热点分析,探究样本的空间分布及变异性质。

a. 经典统计学。经典统计学分析包括统计样本均值、方差、最大值、最小值、变异系数(C_v)及数据的 K-S 正态分布检验。 C_v 为样本标准差与均值的比值,其反映特征变量的空间变异程度,变异性较低的样本能够很好预测总体的信息。一般来说, $C_v \leq 0.1$ 为弱变异, $0.1 < C_v < 1.0$ 为中等程度变异, $C_v \geq 1.0$ 为强变异^[19]。

b. 地统计。空间变异函数是地统计学中用于衡量区域化变量在不同位置差异性的统计指标。以流域内水系参数作为变差函数的区域化变量,构建空间变异函数,采取不同的模型进行拟合,计算变量的实验变差函数,选用拟合度最高的模型,然后对其进行普通 Kriging 插值,分析参数变量在空间格局变化规律,剖析空间格局上的相关性。其半变异函数模型表达式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h/a}) \tag{9}$$

式中: $\gamma(h)$ 为空间距离为 h 时的半方差; C_0 为当 $h=0$ 时所取得的块金值,代表人为活动和样本检测误差等因素引起的随机变异; C 为偏基台值; a 为空间自相关的理论距离。

随着距离 h 的增加, $\gamma(h)$ 从块金值逐渐增加到基台值 C_0+C ;基台值则是 $\gamma(h)$ 在距离 $h \rightarrow \infty$ 时的极限值,表示数据的最大空间变异程度。

块金值与基台值的比值(块基比)大小能够衡量空间自相关的程度。块基比小于 0.25,说明变量具有强烈的空间自相关性;块基比为 0.25~0.75 时,变量具有中等程度的空间自相关性;块基比大于 0.75 时,空间自相关性较弱^[20]。

c. 冷热点分析。以冷热点分析方法观察参数空间上的集聚性,其统计量计算公式为

$$G_i^* = \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} v_j - \bar{v} \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) / \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2}{n-1}} \tag{10}$$

式中: G_i^* 为第 i 个空间单元的统计量; n 为空间单元的总数; v_j 为邻域内第 j 个要素的属性值; w_{ij} 为要素 i 和 j 之间的空间关系; $\bar{v}$ 为所有空间单元的属性值的均值; S 为所有空间单元的标准差。

对每个 G_i^* 值进行显著性 Z 检验。 z 得分为正时, z 得分越高,高值(热点)的聚类就越紧密; z 得分为负时, z 得分越低,低值(冷点)的聚类就越紧密。

2.5 聚类分析

聚类方法通过计算欧式距离能够识别出相似的

地貌环境,并区分显著不同的地貌环境。欧氏距离计算公式为

$$d(P_i, U_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (P_{i,j} - U_{k,j})^2} \tag{11}$$

式中: $d(P_i, U_k)$ 为 P_i 到 U_k 的欧氏距离; p 为特征维度; P_i 为第 i 个样本的特征向量; U_k 为第 k 个簇的中心向量; $P_{i,j}$ 为 P_i 的第 j 个特征值; $U_{k,j}$ 为 U_k 的第 j 个特征值。

3 结果与分析

3.1 样本归类结果

根据分维数对地貌发育阶段进行划分,分为幼年期($D < 1.6$)、壮年期($1.6 \leq D < 1.89$)、老年期($D \geq 1.89$)。基于区域单元类型归类方法,样本归类结果如表 1 所示。长江流域处于幼年期发育阶段的样本占比最高为 69.2%,表明长江流域发育潜力远大于其他 3 个流域。而处于壮年期发育阶段的样本在 4 大流域中占比均较高,其中长江流域占比达到 62%,黄河流域也达到了 57%,表明长江和黄河流域基本处于发育壮年,发育潜力大。而海河和淮河流域的水系大多处于老年期,老年期在两个流域中占比均达到了 53%。

表 1 样本归类结果

Table 1 Sample classification result						
地形区	地貌发育阶段	样本数	长江流域	黄河流域	淮河流域	海河流域
高山高原	幼年期	5	3	2		
	壮年期	15	8	7		
	老年期	1		1		
中低山	幼年期	4	4			
	壮年期	19	7	8		4
	老年期	10		7		3
丘陵	幼年期	1	1			
	壮年期	11	11			
	老年期	5	5			
平原	幼年期	3	1		1	1
	壮年期	16	7	1	6	2
	老年期	22	7	2	8	5
总体		112	54	28	15	15

注:统计总体包括图 1 划分的 111 个流域及其中龙羊峡流域的子流域,致样本总数达到 112。

3.2 两大定律适应性分析结果

3.2.1 Horton 定律

本文基于 DEM 模型提取了从 1 级至最高级别 6~8 级不等的水系数据,并利用 Horton 定律对其进行了拟合分析。由于篇幅限制,本文仅展示海河流域部分子流域分支比和长度比的回归关系拟合结果(图 2)。长江、黄河及淮河流域的不同地貌单元的拟合情况与图 2 相似。由拟合结果可见,不同空间尺度流域 Horton 定律拟合曲线的线性相关系数 R^2

值几乎均大于 0.9,表明流域面积虽然存在较大差异性(0.8 万~10 万 km²),但分支比、长度比仍能满足 Horton 定律。

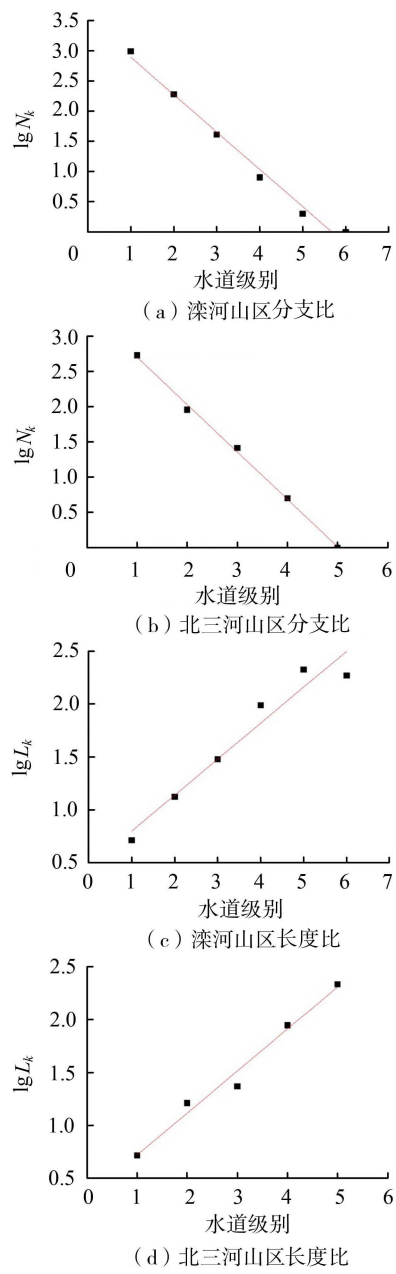


图 2 海河部分子流域分支比和长度比回归关系
Fig.2 Regression relationship diagram of branching ratio and length ratio in some subbasins of the Haihe River

通过图 3 可发现不同地貌单元水系霍顿比分布相对集中且相似。除大通河、沁丹河和信江等个别典型流域外,所有流域的分支比 R_B 值均为 3~5,长度比 R_L 值均为 1.5~3.0。异常值大都处于黄土高原和发育程度极高的平原地区。

3.2.2 Hack 定律

不同地貌区与不同地貌发育阶段流域干流长度与流域面积的双对数线性拟合曲线如图 4 和图 5 所示,Hack 定律拟合结果见表 2。Hack 定律在不同地

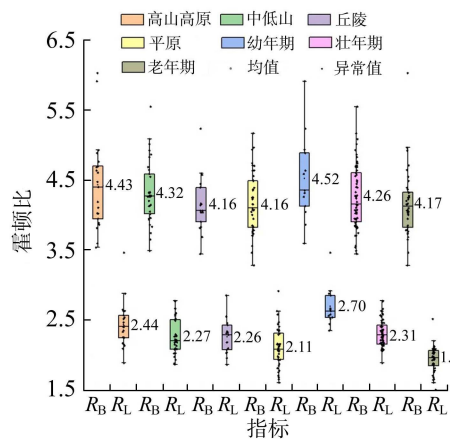


图 3 霍顿比在不同地貌的分布
Fig.3 Distribution of Horton's ratio in different landscapes

形区不同发育阶段的 R^2 均在 0.6 以上,表明该定律对各种地形不同发育阶段均适用,但幂指数有所差异。因此,使用 Hack 定律时需注意幂指数的差异性。

幂指数作为一种标度因子可以反映各水系中单位流域面积的河道长度或弯曲度^[21]。由表 2 可以发现,幂指数在 0.460~0.600 之间分布。高原高山地形区的幂指数较大,与我国高原高山地区河道长且弯曲的性质相符;幂指数在中低山地貌区和丘陵地貌区基本一致,表现出相似的性质;而在平原地貌区幂指数显著降低,与我国平原流域广泛的网状结构相一致。平原地貌侵蚀性较弱,多位于降水丰富的地区,河道短且顺直。

在按地貌发育阶段对样本拟合时,由于幼年期样本较少,因此将各地形区的幼年期样本进行统一拟合,其幂指数可作为不同地形幼年期地貌单元结构参数的参考值。结果表明:在幼年期,河网水系稀少,幂指数较小;在壮年期,水系逐渐完善,幂指数显著增大;而在老年期,地面形态变化缓慢,趋于平原,支流减少,幂指数大幅下降。

观察图 2~5 可知,拟合相关性均较好,表明两大地貌定律在多种地貌均具有较好的适应性。流域受地质构造和自然环境的影响,水系形态表现出多样丰富的形态,但其结构在不同尺度上仍表现出一定的自相似性,水系结构服从以平面长度等因素为代表的特定拓扑几何规律。

需要注意的是,上述结果基于天然水系的研究成果得出,随着城市化进程的加快和人类对自然水系干预的加深,许多流域的水系结构发生了显著变化,例如人工沟渠的增加、河道的裁弯取直以及湿地面积的减少等^[22]。由于改造过程中常对低级别河流进行填埋,将导致霍顿比减小,河网功能受到明显削弱。同时大量沟渠的引入,使得水系的自然树状分形特征被破坏,转变成环状拓扑结构。传统的霍

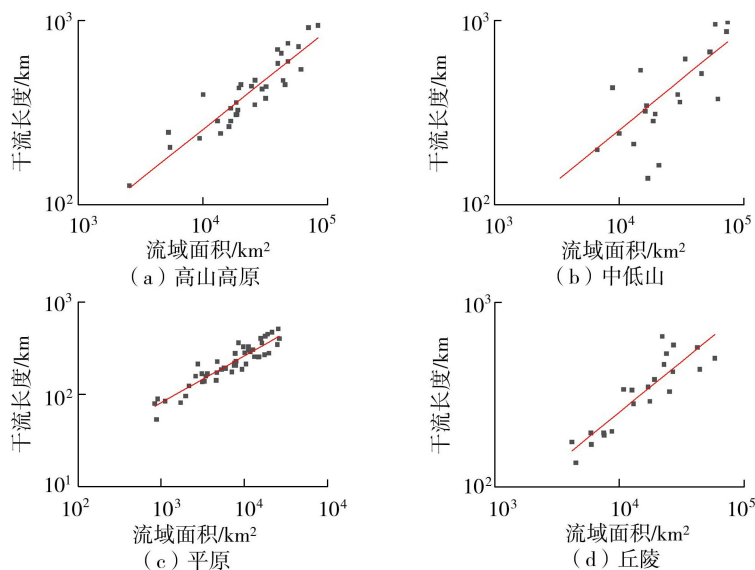


图 4 不同地貌区干流长度-面积双对数线性拟合

Fig. 4 Double logarithmic linear fitting of main stream length-area in different landscapes

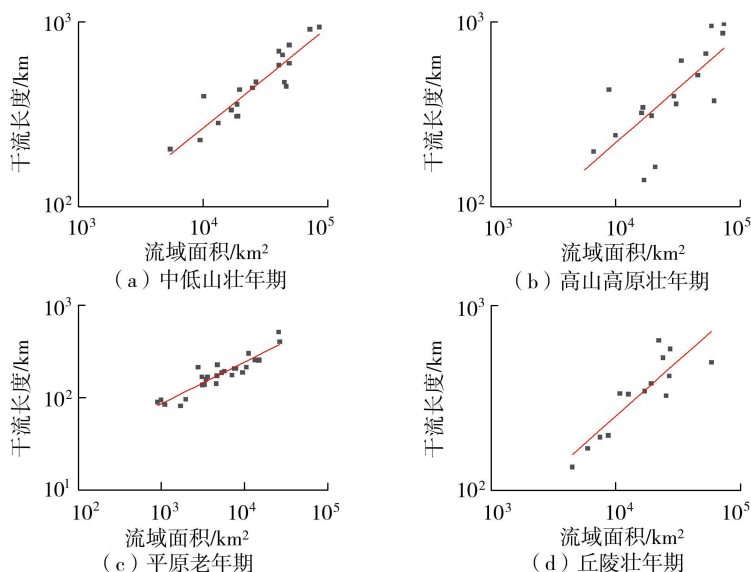


图 5 不同地貌发育阶段干流长度-面积双对数线性拟合

Fig. 5 Double logarithmic linear fitting of main stream length-area in different landscapes

表 2 Hack 定律的拟合结果

Table 2 Fitting results of Hack's law

地形区	地貌发育阶段	样本数	幂指数	乘积系数	R^2
高山高原区	壮年期	17	0.592	1.302	0.690
	总体	24	0.572	1.316	0.754
中低山区	壮年期	20	0.543	1.832	0.843
	总体	35	0.539	1.807	0.832
丘陵区	壮年期	14	0.600	1.012	0.748
	总体	22	0.551	1.591	0.644
平原区	壮年期	20	0.552	1.709	0.763
	老年期	26	0.460	3.556	0.858
	总体	49	0.506	2.502	0.810
总计		130	0.524	2.108	0.818

注:统计总体包括 111 个流域及其中部分流域的子流域,故样本总数达到 130 个流域。12 类地貌区中部分地貌区如高山高原老年期地貌样本数量较少,其统计意义不明显,表中不展示其拟合结果。

顿定律在描述此类复杂水系结构时存在局限性,应用过程中需要对霍顿-斯特拉勒分级法则进行适当调整。此时为深入刻画水系结构特征,可以引入复杂网络方法、多重分形谱分析^[23]等新方法。

3.3 样本异质性分析结果

3.3.1 经典统计学结果

样本经典统计结果如图 3 和表 3 所示。从图 3 可见,不同发育阶段(幼年、壮年、老年期)霍顿比呈现出显著的递减趋势,这与地貌循环论相符。不同地形区霍顿比也显示出一定的梯度递减,从高山高原的高值逐步降低到平原地区的低值。

变异系数反映了数据的离散程度。从表 3 可见,不同地貌单元霍顿比的变异系数有所不同,但普

表 3 不同地貌的流域水系分支比、长度比统计结果

Table 3 Statistical results of branching ratio and length ratio of watershed water systems with different landscapes

地形区	地貌发育阶段	样本数	分支比			长度比		
			均值	标准偏差	变异系数	均值	标准偏差	变异系数
高山高原	幼年期	5	4.58	0.915	0.200	2.78	0.429	0.154
	壮年期	15	4.28	0.410	0.096	2.32	0.212	0.091
	总体	21	4.43	0.660	0.149	2.44	0.34	0.140
中低山	壮年期	19	4.33	0.539	0.124	2.33	0.233	0.100
	老年期	10	4.30	0.357	0.083	2.02	0.106	0.052
	总体	33	4.32	0.450	0.104	2.27	0.260	0.115
丘陵	壮年期	11	4.12	0.361	0.088	2.33	0.142	0.061
	总体	17	4.16	0.410	0.099	2.26	0.250	0.111
平原	壮年期	16	4.26	0.463	0.109	2.26	0.161	0.071
	老年期	22	4.06	0.394	0.097	1.87	0.181	0.097
	总体	41	4.16	0.430	0.103	2.08	0.300	0.144
分阶段 合计	幼年期	13	4.49	0.600	0.134	2.64	0.340	0.129
	壮年期	61	4.26	0.450	0.106	2.31	0.190	0.082
	老年期	38	4.17	0.490	0.118	1.94	0.190	0.098
总计		112	4.27	0.491	0.115	2.23	0.316	0.142

注:统计总体包括图 1 划分的 111 个流域及其中龙羊峡流域的子流域,致样本总数达到 112。特殊地,高山高原老年期地貌等一些地貌单元样本数量较少,其统计意义不明显,表中不展示其经典统计结果。

遍较低,除高山高原幼年期样本数据外,变异系数均低于 0.15,说明数据分布相对集中,变异性较小,能很好地代表总体并预测其信息。尽管高山高原幼年期地貌的结构参数样本数较少,导致其变异性相较样本总体略有上升,但其本身变异性低,这些样本仍然具有显著的代表性,可以作为此类地貌单元的参考。

总体来看,长江、黄河流域的高山高原区霍顿比明显高于其他地貌区,中低山区次之。丘陵区和平原区的分支比相近,但丘陵区的长度比明显高于平原区。平原区河网的发育程度远高于其他地貌区,大多数流域已进入老年期,这导致霍顿比减小,地形趋于平缓,支流数量减少。未来的水文研究应关注这些地貌区域的水文特性和水资源管理问题。

3.3.2 空间分布格局

为研究地貌定律空间分布格局及在空间上是否具有显著相关性,将 111 个流域样本单独进行地统计空间半方差函数拟合和冷热点分析。地统计拟合首先应验证数据序列是否符合正态分布,分支比和长度比的偏度分别为 0.48、0.68,均趋于 0,可以看出数据序列符合正态分布,如图 6 所示。拟合模型采用球型模型拟合,拟合的均方根 RMS 值均趋于 0,半方差函数曲线的拟合效果好。分支比的半方差拟合结果中块基比远大于 0.75,长度比的块基比为 0.264,表明分支比的空间自相关性弱,而长度比在空间上分布具有一定相关性。

分支比空间分布见图 7,长度比空间分布见图 8。霍顿比在空间上分布总体上呈现随机态势,未显示出明显的相关性。然而,在地形地貌相似的

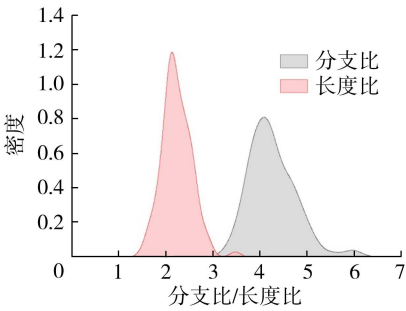


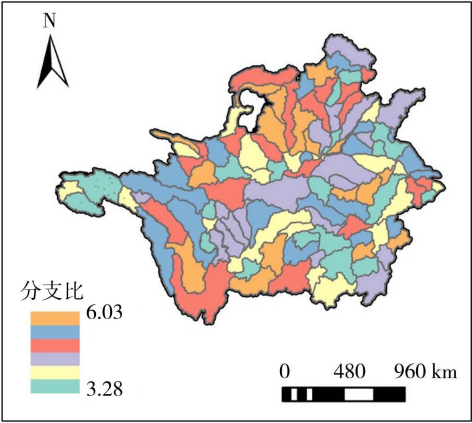
图 6 分支比和长度比拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of branching ratio and length ratio

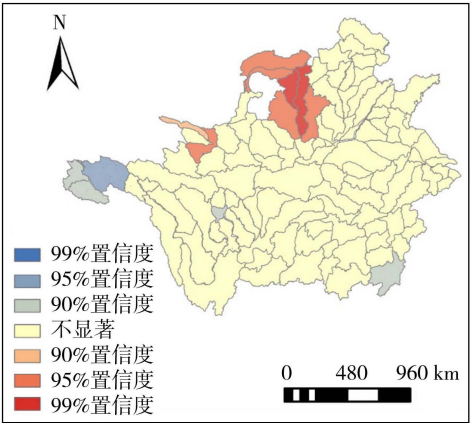
区域仍出现了集聚现象。例如,黄土高原区出现高值集聚,这与黄河流域沟壑破碎的地貌特征密切相关,黄河流域植被覆盖率不高,黄土地貌导致流域分支比较高,同时分支比高、长度比低的情况也符合黄河流域河网破碎的特征。

长度比的高值集聚出现在高山区,而低值集聚出现在平原区。长江流域上游由于强烈的水力侵蚀,河网破碎,分支比较高,并且上游地区多为辫状河网^[1],因此长度比较大。而平原区长度比较低,符合其河网的实际情况,平原区河网通常呈网状或扇状结构,河流短小平直。此外,注意到分支比和长度比的低值集聚在四川盆地,而四川盆地周边的云贵高原地区地质构造活跃,广泛分布石灰岩,并且气候湿润,形成了喀斯特地貌,这导致该区域分支比和长度比较高。

依据分支比和长度比的成果,利用公式(6)计算流域霍顿分维数。图 9(a)展示了霍顿分维在四大流域的空间分布情况。可以发现大部分流域处在地貌发育的壮年期,水系逐渐完整,曲流发育。然



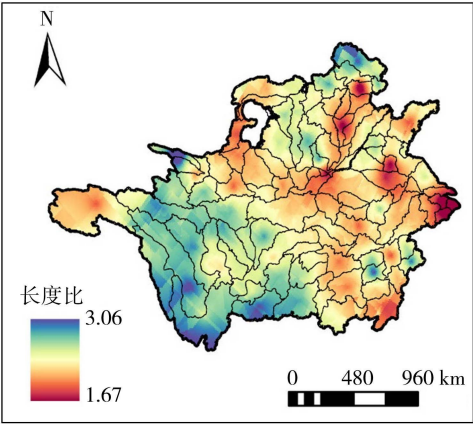
(a) 成果图



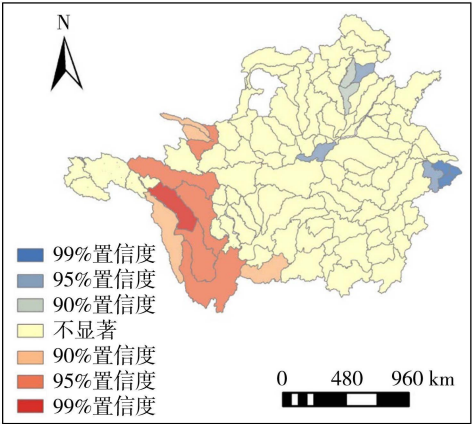
(b) 冷热点图

图 7 分支比空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of Branching ratio



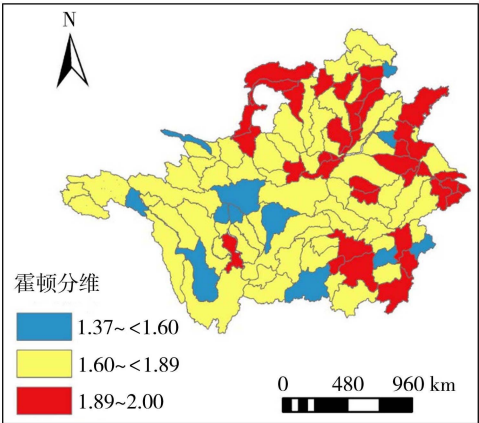
(a) 成果图



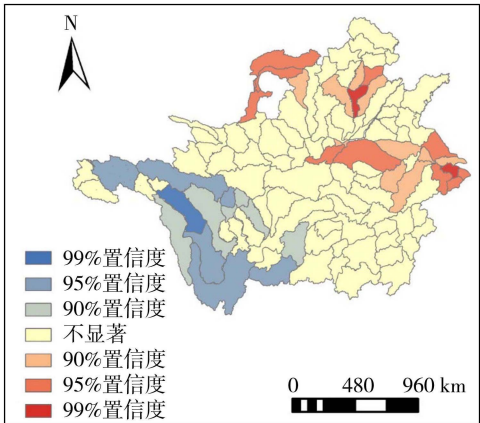
(b) 冷热点图

图 8 长度比空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of length ratio



(a) 成果图



(b) 冷热点图

图 9 地貌发育情况

Fig. 9 Landscape development situation

而,也有部分流域已进入老年期,这些流域主要分布在华北平原、华东平原及东南丘陵区,其水系结构趋于稳定,但可能伴随着支流减少,湖泊沼泽化等老化现象,需注意采取相关水资源管理措施。图 9(b)进一步揭示了霍顿分维的空间集聚特征。高值集聚区广泛出现在平原和高原地区,如华北平原、华东平原

以及黄土高原区,平原地区由于水流汇聚能力强,使得水系结构相对复杂,霍顿分维值较高。相反,低值集聚区则主要集中在长江流域上游的高山区,这些地区地形陡峭,水流速度快,水系结构简单,因此霍顿分维值较低。上述现象不仅符合地理学第一定律(即空间相近性原理),也体现了地理学第三定律(即综合相

似度高的地区出现相似特征的规律),即在地理空间上接近且自然地理环境相似的区域,其水系结构趋于一致;空间距离远的区域若地理环境相似,也可能出现一致的水系结构。

3.4 流域结构参数推荐值

根据前述研究结果,地貌定律在四大流域不同地貌区具有良好的适应性。水系呈现自相似性,并在空间上显示出显著的异质性。霍顿比在不同地形单元存在一定梯度递减分布趋势,地形单元在不同发育阶段其霍顿比值有显著梯度分布趋势。特征指标在空间上呈现随机正态分布,但在地理环境相似地区,存在着集聚现象。

表 4 K-means 聚类分析结果

Table 4 K-means clustering analysis result

地貌区	霍顿分维	流域面积/万 km ²	河网密度	分支比	长度比	平均高程/m	平均坡度/%
高原区	1.73 *	4.111	0.157	4.58	2.66	3625	23.10
高山区	1.76 *	4.227	0.167	4.02	2.28	4569	12.14
高原-中低山过渡区	1.87 *	2.58	0.174	4.34	2.22	2956	15.91
中低山老年区	1.91 **	3.59	0.171	4.50	2.28	1190	11.45
中低山壮年期	1.79 *	4.548	0.157	4.02	2.23	1973	19.34
丘陵区	1.85 *	3.049	0.176	4.25	2.26	692	12.46
平原区	1.90 **	2.298	0.183	4.20	2.12	110	4.77

注: * 代表流域处于发育壮年期; ** 代表流域处于发育老年期。

在实践应用中,霍顿比及流域面积等结构参数可作为基础数据,用于构建简单水文模型、预测水流运动和分布,评估水资源分布、洪水风险等^[24]。此外,分支比和长度比可直接计算得到霍顿分维数,从而判断流域地貌发育程度,可用于制定更为合理的水资源分配和利用方案,评估生态环境状况,指导生态保护和恢复项目^[25]。地貌定律的存在为缺资料地区的水资源管理和生态环境保护提供了支持和指导。

4 结 论

- a. Horton 定律和 Hack 定律在不同地貌都具有良好的适应性。Horton 的河数和河长定律的对数回归拟合相关系数普遍在 0.9 以上,Hack 定律的双对数回归拟合相关系数也在 0.6 以上,适用于各种地貌和发育阶段。不同地貌区河网的霍顿比分布集中且相似。除大通河、沁丹河和信江等个别流域外,所有流域的分支比值均为 3~5,长度比值均为 1.5~3.0。
- b. Horton 定律和 Hack 定律存在显著空间异质性。从幼年、壮年到老年期 3 个不同发育阶段的霍顿比具有显著梯度递减趋势,霍顿比在不同地形区呈现出一定梯度递减的趋势,由高山高原的高值逐步递减至平原地区的低值。
- 在空间上霍顿比则呈现随机正态分布的趋势,

通过 K-means 聚类分析识别相似地貌,表 4 总结了不同地貌区流域的霍顿比和分维等参数。结果显示,平均高程、坡度和地貌的起伏发育显著影响地貌定律特征指标,从而塑造了复杂多样的水系结构。在平坦地貌区,霍顿比相对较小;而在发育壮年的山区流域,水系长度比较大;进入老年期后,水系发育愈加成熟,分支比显著升高。然而,高分支比地区不一定意味着水系更为成熟,低霍顿比地区也不一定代表水系未成熟。例如,处于发育晚期的平原流域可能出现分支比偏小的情况。黄土高原地貌区的壮年期则表现出较大的分支比,这是由极其破碎和独特的地质条件共同导致的。

空间相关性不显著,仅在某些特定地区表现出集聚的情况。海拔、坡度和降水等多种因素都影响着水系的霍顿比和分维,降水丰富、海拔高、坡度大及地质构造活跃的地区常伴随较高的霍顿比。四大流域中超半数流域都处于发育壮年期,仍有较大的发育潜力,水系逐渐完整,曲流发育,其中长江流域的发育潜力远大于其他 3 个流域。

c. 利用 K-means 聚类分析,归纳总结出 7 类地貌区的霍顿比。高原区、高山区、高原-中低山过渡区、中低山老年期区、中低山壮年期区、丘陵区、平原区的分支比推荐值分别为 4.58、4.02、4.34、4.50、4.02、4.25、4.20,其长度比参考值分别为 2.66、2.28、2.22、2.28、2.23、2.26、2.12。

参考文献:

[1] LI Fawen, LUO Qingyang, ZHAO Yong. Characterization and classification of river network types [J]. Water Resources Management, 2023, 37 (7) : 6219-6236.

[2] RODRIGUEZ-ITURBE I, MUNEEPEERAKUL R, BERTUZZO E, et al. River networks as ecological corridors: a complex systems perspective for integrating hydrologic, geomorphologic, and ecologic dynamics [J]. Water Resources Research, 2009, 45 (1) : W01413.

[3] 凌红波,徐海量,乔木,等. 1958—2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析 [J]. 地理科学进展, 2010, 29 (9) : 1129-1136. (LING Hongbo, XU

- Hailiang, QIAO Mu, et al. Temporal-spatial evolution of stream construction and its driving forces in Manas River Basin during 1958-2006 [J]. Progress in Geography, 2010,29(9):1129-1136. (in Chinese))
- [4] 陈彦光,刘继生. 水系结构的分形和分维;Horton 水系定律的模型重建及其参数分析[J]. 地球科学进展,2001,16(2):178-183. (CHEN Yanguang, LIU Jisheng. Fractals and fractal dimensions of structure of river systems;models reconstruction and parameters interpretation of Horton's laws of network composition [J]. Advances in Earth Science,2001,16(2):178-183. (in Chinese))
- [5] 刘怀湘,王兆印. 典型河网形态特征与分布[J]. 水利学报,2007,38(11):1354-1357. (LIU Huaixiang, WANG Zhaoyin. Morphological feature and distribution of typical river networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(11):1354-1357. (in Chinese))
- [6] TOKUNAGA E. Consideration on the composition of drainage networks and their evolution[R]. Tokyo,Japan: Tokyo Metropolitan University,1978.
- [7] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography,1970,46(Sup1):234-240.
- [8] ANSELIN L. What is special about spatial data? Alternative perspectives on spatial data analysis [R]. Santa Barbara;National Center for Geographic Information and Analysis,1989.
- [9] GOODCHILD M F. The validity and usefulness of laws in geographic information science and geography[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(6):300-303.
- [10] ZHU Axing, LU Guonian, LIU Jing, et al. Spatial prediction based on Third Law of Geography[J]. Annals of GIS,2018,24(4):225-240.
- [11] MARITAN A,RINALDO A,RIGON R,et al. Scaling laws for river networks[J]. Physical Review E,1996,53(2):1510-1515.
- [12] WILLEMIN J H. Hack's law: sinuosity, convexity, elongation[J]. Water Resources Research,2000,36(11):3365-3374.
- [13] 罗晴阳,李发文,金相楠. 流域水网环境异质性及驱动力分析[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(5):141-156. (LUO Qingyang,LI Fawen,JIN Xiangnan. Analysis of environmental heterogeneity and driving forces of water network in river basins [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(5):141-156. (in Chinese))
- [14] 史书汇,王晓云,李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):117-126. (SHI Shuhui,WANG Xiaoyun,LI Fawen. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1):117-126. (in Chinese))
- [15] 沈玉昌. 中国地貌的类型与区划问题的商榷[J]. 第四纪研究,1958,1(1):33-41. (SHEN Yuchang. Discussion on the types and regionalization of Chinese landforms[J]. Quaternary Sciences,1958,1(1):33-41. (in Chinese))
- [16] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996,(2):124-128. (HE Longhua, ZHAO Hong. Fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Geographical Sciences, 1996,(2):124-128. (in Chinese))
- [17] 雷雪,罗明良,周毅,等. 基于 DEM 的典型地貌区河流形态特征分析[J]. 水文,2018,38(4):48-54. (LEI Xue,LUO Mingliang,ZHOU Yi, et al. Research on river morphology characteristics in typical geomorphologic areas based on DEM [J]. Journal of China,2018,38(4):48-54. (in Chinese))
- [18] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赟,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun,et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4):74-82. (in Chinese))
- [19] 王猷,鲁敏,侯红星,等. 山区平原过渡区土地地表基岩空间异质性特征分析:以河北省易县东部地区为例[J]. 中国地质调查,2023,10(3):60-66. (WANG Xian, LU Min, HOU Hongxing, et al. Analysis of spatial heterogeneity of soil substrate in mountainous plain transition area;a case study of Eastern Yi County of Hebei Province[J]. Geological Survey of China,2023,10(3):60-66. (in Chinese))
- [20] 童童,梅帅,刘莹,等. 基于 GIS 的环巢湖地区土壤养分空间变异特征研究[J]. 农业环境科学学报,2023,42(7):1522-1531. (TONG Tong, MEI Shuai, LIU Ying, et al. Spatial variation of soil nutrient characteristics around Chaohu Lake based on GIS results [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7):1522-1531. (in Chinese))
- [21] 陈彦光,李宝林. 吉林省水系构成的分形研究[J]. 地球科学进展,2003,18(2):178-184. (CHEN Yanguang, LI Baolin. Studies of the fractal network composition of rivers in Jilin Province, China[J]. Advances in Earth Sciences, 2003,18(2):178-184. (in Chinese))
- [22] 陈云霞,许有鹏,付维军. 浙东沿海城镇化对河网水系的影响[J]. 水科学进展,2007,18(1):68-73. (CHENG Yunxia, XU Youpeng, FU Weijun. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of East Zhejiang Province. [J]. Advances in Water Science, 2007,18(1):68-73. (in Chinese))

[23] 李子贻, 许有鹏, 何玉秀, 等. 城市化下平原河流水系变化及空间响应 [J]. 生态学报, 2021, 41 (22): 8953-8964. (LI Ziyi, XU Youpeng, HE Yuxiu, et al. Changes of plain river network and its spatial responses to urbanization. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (22): 8953-8954. (in Chinese))

[24] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, HAN Rui, et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling

model in complex river network area [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 162-169. (in Chinese))

[25] 王鹏, 华祖林, 褚克坚, 等. 高度城镇化地区河网水生态调控方案 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 205-212. (WANG Peng, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 205-212. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 06 - 03 编辑: 徐娟)

(上接第 18 页)

[16] 胡爱兵, 张书函, 陈建刚. 生物滞留池改善城市雨水径流水质的研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33 (1): 74-77. (HU Aibing, ZHANG Shuhan, CHEN Jiangang. Progress on the improvement of urban stormwater runoff quality by bioretention [J]. Environmental Pollution and Control, 2011, 33 (1): 74-77. (in Chinese))

[17] 李俊奇, 孙梦琪, 李小静, 等. 生物滞留设施对雨水径流热污染控制效果试验 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 6-12. (LI Junqi, SUN Mengqi, LI Xiaojing, et al. Experimental study on thermal pollution control of stormwater runoff by bioretention [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 6-12. (in Chinese))

[18] 陈垚, 杨威, 王健斌, 等. 雨水生物滞留设施中植被的设计与养护 [J]. 中国给水排水, 2017, 33 (12): 6-11. (CHEN Yao, YANG Wei, WANG Jianbin, et al. Design and maintenance of vegetation in bioretention facilities [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (12): 6-11. (in Chinese))

[19] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践 [J]. 城市规划, 2015, 39 (6): 26-36. (YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. “Sponge city”: theory and practice [J]. City Planning Review, 2015, 39 (6): 26-36. (in Chinese))

[20] 刘增超, 李家科, 蒋春博, 等. 4 种生物滞留填料对径流污染净化效果对比 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (4): 71-79. (LIU Zengchao, LI Jiak, JIANG Chunbo, et al. Comparison of purification effects of 4 kinds of bioretention fillers on runoff pollutants [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (4): 71-79. (in Chinese))

[21] 吴洋. 基于片区降雨与污染特征的初雨冲刷截流理论研究 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40 (11): 115-118. (WU Yang. Study on the theory of initial rain scouring and interception based on regional rainfall and pollution characteristics [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40 (11): 115-118. (in Chinese))

[22] YUAN Chen, DAVIS P, KAYA D, et al. Distribution and biodegradation potential of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) accumulated in media of a stormwater bioretention

[J]. Chemosphere, 2023, 336: 139188.

[23] 王鑫格, 李娜, 韩颖楠, 等. 二噁英及类二噁英污染物致免疫毒性作用机制研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2023, 18 (1): 138-148. (WANG Xinge, LI Na, HAN Yingnan, et al. Research progress on immunotoxic mechanism of dioxins and dioxin-like pollutants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18 (1): 138-148. (in Chinese))

[24] BERTILSSON S, WIDENFALK A. Photochemical degradation of PAHs in freshwaters and their impact on bacterial growth: influence of water chemistry [J]. Hydrobiologia, 2002, 469 (1/2/3): 23-32.

[25] 朋四海, 李田, 黄俊杰. 合肥地区生物滞留设施的合理构型和设计参数 [J]. 中国给水排水, 2014, 30 (17): 145-149. (PENG Sihai, LI Tian, HUANG Junjie. Reasonable configuration and design parameters of bioretention facilities in Hefei [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (17): 145-149. (in Chinese))

[26] LOFFREDO E, SENESI N. Fate of anthropogenic organic pollutants in soils with emphasis on adsorption/desorption processes of endocrine disruptor compounds [J]. Pure and Applied Chemistry, 2006, 78 (5): 947-961.

(收稿日期: 2024 - 08 - 20 编辑: 王芳)

