

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.038

流域土壤重金属分布式运移模型研究

王圣伟 冀豪 王苗 娄天泷 张畅

(西北师范大学计算机科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为利用遥感信息提取技术实现流域大尺度范围的土壤重金属运移估算, 对大夏河流域进行采样调查, 通过分析大夏河流域及其支流的土壤和水体样品, 测定重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb 的含量和分布特征, 结果表明, 5 种重金属含量从大到小依次为 Cr、As、Cu、Pb、Cd。根据流域河网分形特征, 提出采用分布式运移模型估算大夏河流域的重金属运移量。应用 GIS 技术, 采用网格法对大夏河流域及其子流域进行分维数提取并修正, 其水系分维值为 1.0163, 小于 1.6, 判定大夏河流域地貌处于幼年期。对流域的相似性进行了建模验证与分析, 并根据相似流域分维值和径流数据拟合关系, 研究子流域径流量, 进一步估算分布式重金属运移量, 通过对比 SCS-CN 模型估算量进行验证。大夏河流域重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb 的运移量估算结果为 0.671 0、0.209 9、6.281 6、1.746 5、1.837 7 t/a。

关键词: 大夏河流域; 重金属; 分布式; 运移模型

中图分类号: S151.9⁺5; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)12-0332-09

Distributed Migration Model of Heavy Metals in Watershed

WANG Shengwei JI Hao WANG Miao LOU Tianlong ZHANG Chang

(College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to realize the estimation of soil heavy metal migration in large-scale watersheds, the remote sensing information extraction technology plays an important role in such problems. A small and medium-sized watershed (the Daxia river basin) in Northwest China was sampled and investigated. By analyzing the soil and water samples of the Daxia river basin and its tributaries, the contents and distribution characteristics of heavy metals—As, Cd, Cr, Cu and Pb were determined. The contents of five heavy metals were ranked in descending order as the follows: Cr, As, Cu, Pb and Cd. According to the fractal characteristics of river network in river basins, a distributed migration model was put forward to estimate the heavy metal migration in the Daxia river basin. The fractal dimension of the Daxia river basin and its tributaries were extracted and corrected by using grid method and GIS technology. The fractal dimension of the water system was 1.0163, which was less than 1.6, and determined the geomorphology of the Daxia river basin in its infancy. The similarities of the watershed was modeled and verified. And based on the similarities between the fractal dimension and the runoff data, the sub-basin runoff volume was further studied to estimate the distributed heavy metal migration, which was verified by comparing the estimated amounts of the SCS-CN model. The migration estimation results in heavy metals—As, Cd, Cr, Cu and Pb in the Daxia river basin were 0.671 0 t/a, 0.209 9 t/a, 6.281 6 t/a, 1.746 5 t/a and 1.837 7 t/a, respectively.

Key words: Daxia river basin; heavy metal; distributed; migration model

0 引言

我国各流域尤其是中小流域土壤都面临着程度不一的水资源环境污染问题, 对农业及经济发展造成了深远的影响。借助 GIS 技术合理估算流域土壤

重金属运移量, 能够对农业生产生态环境实现总体目标控制。国内外学者对于重金属污染运移的预测模型研究较为关注。RODE 等^[1] 针对水环境的未来发展趋势, 提出了一种综合水质模型, 该模型的模拟结果表明, 在河流较宽的部分, 重金属积聚在通道边

收稿日期: 2019-04-25 修回日期: 2019-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61563047)

作者简介: 王圣伟(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业信息化技术和空间信息研究, E-mail: flaxwork_mail@qq.com

缘附近,并且由于侵蚀作用可能在未来会重新迁移。Al-MUR 等^[2]分析了吉达附近红海 4 个沉积物岩芯中重金属的分布,结果表明,在红海中重金属 Mn、Cu 和 Pb 具有较高的含量,核心沉积物中的重金属浓度在吉达中部附近增加,并且近年来已经逐步升高。CHO 等^[3]基于 Clark 单位线图及其空间分解方法的组合概念,并结合精细的空间变量流动力学,实现了空间分布的水文模拟,开发了一种集总概念和分布式特征混合水文模型。MEDIERO 等^[4]提出了一种基于分布式水文模型参数概率表示的标定方法,该方法用于曼萨纳雷斯河流域的案例研究,以校正后的模型作为实时洪水预报的决策支持工具。UNDUCHE 等^[5]开发了 4 种水文模型(WATFLOOD、HBV-EC、HSPF 和 HEC-HMS),从复杂的完全分布模型到相对简单的集总模型,并对其有效性和准确性进行了校准和测试,以作为洪水预报的实用工具。这 4 种模型均能准确地模拟流量,可用于洪水预报,但是 WATFLOOD 和 HEC-HMS 模型在模拟高流量时表现不佳,HSPF 和 HBV-EC 模型在大多数情况下对低流量预测过高,且这 4 种模型仅应用于草原流域的流量预测,对其他非草原流域的预测结果有待考证。

本研究以大夏河流域及其子流域的土壤和水体中重金属为切入点,对重金属的含量和迁移特征进行统计和分析,根据大夏河流域重金属的总体分布情况,选取 5 种易造成污染的重金属 As、Cd、Cr、Cu 和 Pb 进行分析,采用 GIS 图像处理技术和数据分析方法对流域遥感和水文数据进行处理,结合大夏河流域地貌形态特征和流域 DEM 数据进行分形计算,提出流域土壤重金属分布式运移模型,对大夏河流域土壤中重金属的运移量进行估算。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大夏河属于黄河上游的一级支流,地处青藏高原与黄土高原过渡带(东经 $102^{\circ}2' \sim 103^{\circ}23'$,北纬 $34^{\circ}51' \sim 35^{\circ}48'$)。大夏河经夏河县城东北流入,出土门关后进入临夏盆地,自西向东横贯临夏市、至折桥转向东乡县泄湖峡,在康家湾喇嘛川塔张村注入刘家峡水库^[6]。主河道总长 203 km,总流域面积 $7\,152\text{ km}^2$,多年平均流量 $34.3\text{ m}^3/\text{s}$,年均径流量 11 亿 m^3 ,多年含沙量 $3.49\text{ kg}/\text{m}^3$,年输沙量 $4.192 \times 10^{10}\text{ kg}$,林地面积 $3.27 \times 10^6\text{ hm}^2$,占流域总面积的 21.2%^[7]。

1.2 流域分级与划分

根据大夏河流域边界的经纬度,从地理空间数

据云上高级检索,下载包含大夏河流域的 DEM 图像数据(共 4 块),将下载的原始 DEM 图像导入 ArcMAP 软件,需要应用 ArcMAP 软件中数据管理工具—栅格—栅格数据集—镶嵌工具,把 4 块分散的栅格数据图合并到一起,然后根据大夏河的流域边界把大夏河流域从 4 块合并的栅格数据上裁剪,如图 1 所示。

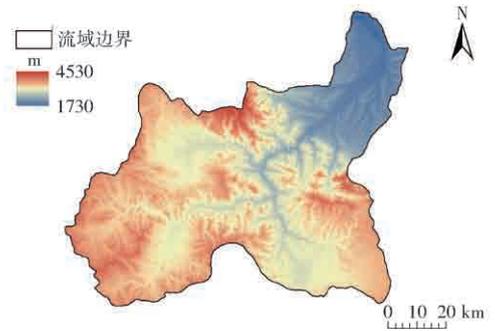


图 1 大夏河高程图

Fig. 1 Digital elevation model of Daxia river

本文首先对大夏河流域选取合适的阈值^[8-9]进行河网水系提取,然后根据 Strahler 和 Shreve 这两种流域分级法^[10],并结合 ArcMAP 软件 Spatial Analyst—水文分析—河网分级工具,对大夏河流域进行分级处理。而流域的划分首先需要确定各个子流域的出水口位置,然后根据水流流向^[11-12]判断流入该出水口的所有上游区域,即为子流域,在 ArcGIS 软件中把大夏河流域划分成 7 个子流域,如图 2 所示。

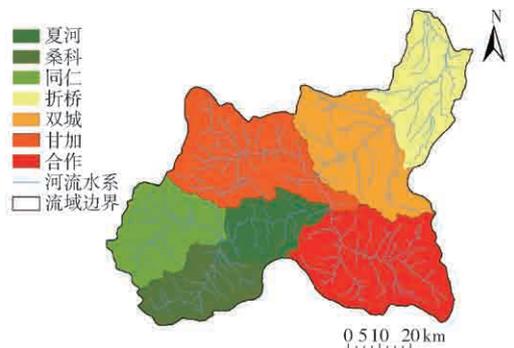


图 2 大夏河子流域区域划分

Fig. 2 Regional division of sub-basins of Daxia river basin

1.3 数据处理与分析

2016—2018 年,使用手持式 GPS 记录位置,采集大夏河流域周边土样和水样,以全年存在稳定径流为依据,共 26 个采样点,采样位置具有代表性,见图 3。在野外将样品放入自封袋中,编号后带回实验室,对土壤样品进行四分法取样后风干,研磨过 200 目尼龙筛,放入对应编号的样品容器内,对流域水样摇匀,也装入对应编号的样品容器内,大约 40 mL^[13]。样品以及标准样送往中国科学院兰州化

学物理研究所进行检测,运用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES 测定重金属的含量^[14],As、Cd、Cr、Cu、Pb 5 种重金属的检出限分别为 0.42、0.012、0.018、0.014、0.42 mg/L。



图3 大夏河流域采样点分布图

Fig.3 Distribution map of sampling points in Daxia river basin

1.4 重金属运移模型

1.4.1 SCS-CN 运移模型

流域污染物的运移研究直接影响环境科学的进展,通常采用数学模型预测污染物的运移规律^[15]。掌握流域重金属运移规律可以有效地控制与治理环境污染^[16]。国外对于城市小流域进行地表径流污染特征的提取应用较为广泛^[17],国内相关资料较少。流域土壤的质地对重金属的迁移有一定的影响^[18]。SCS-CN 模型由美国农业部土壤保持局(USDA SCS)提出,由于对输入数据量要求不高,模拟精度高而被许多国家和地区广泛应用^[19]。本文选取大夏河流域及其支流,以 As、Cd、Cr、Cu、Pb 5 种重金属为估算对象,结合不同土地利用类型,统计流域降雨径流的 SCS-CN 模型因子,计算不同土地利用类型下的地表径流量,估算大夏河流域的重金属运移能力^[20]。

流域重金属地表径流运移量公式为

$$\gamma_i = \alpha_i C_i \sum_{j=1}^m A_j \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

其中

$$S = 25400/C_N - 254$$

式中 γ_i ——第 i 类重金属的运移量, t/a

α_i ——第 i 类重金属的水溶出率

A_j ——第 j 个水文响应单元(HRU)的面积, km²

P ——研究区域年降雨量, mm/a

\bar{C}_i ——第 i 类重金属的平均质量比, mg/kg

C_N ——径流曲线数

S ——径流开始前的潜在最大滞留量, mm/a

根据大夏河流域多年降雨量,把大夏河流域按照子流域进行划分,统计各个子流域的年降雨量,并根据子流域划分图,确定子流域的流域面积,如表 1 所示。

表 1 子流域统计结果

Tab.1 Sub-basin statistical results

子流域	年降雨量/(mm·a ⁻¹)	流域面积/km ²
同仁	409.1	824.27
桑科	516.0	705.92
夏河	452.9	558.37
合作	545.0	1367.11
甘加	356.4	1354.38
双城	640.3	1126.81
折桥	476.1	848.15
大夏河	485.1	6785.01

1.4.2 分布式运移模型

定义河网分形维数与地表径流量的函数关系,可以得到大夏河各个子流域用分维值预测的径流量^[21]。考虑到重金属运移量模型的单位换算,应用径流深这一概念消除单位不统一的影响,径流深指在某一时间段内通过流域指定断面的径流量除以该断面以上的流域面积的值^[22],公式为

$$R = \frac{Q}{1000F} \quad (2)$$

式中 R ——径流深, mm

Q ——年径流量, m³

F ——该断面以上的流域面积, km²

根据分维值求得的年径流量,将流域重金属运移量公式定义为

$$\gamma_i = \alpha_i \sum_{j=1}^n \bar{C}_i S_j R \quad (3)$$

式中 S_j ——第 j 个子流域的面积, km²

考虑到径流深的特点,将重金属运移模型公式修改为

$$\gamma_i = \alpha_i \sum_{j=1}^n \bar{C}_i \frac{Q_j}{1000} \quad (4)$$

式中 Q_j ——第 j 个流域分维值模拟的径流量, m³

1.5 模型因子

1.5.1 土地利用类型分类

在 ArcGIS 10.4 下,大夏河流域的土地利用类型经过遥感监督分类解析,主要选取了旱地、林地、草地、水域、居民用地和沼泽地,如图 4 所示。

1.5.2 径流曲线数

径流曲线数 C_N 取决于研究区域的土地利用类型和土壤类型,本文参照《美国国家工程手册》中的 C_N 值^[23],结合流域多年降雨量和土壤湿润程度,确定 C_N 值,如表 2 所示。参照美国水土保持局手册,选定 C_N 为 A 类土壤组。

1.5.3 网格法

应用网格法计算大夏河及子流域的分维数,网格法基本原理为使用不同边长的正方形网格覆盖被

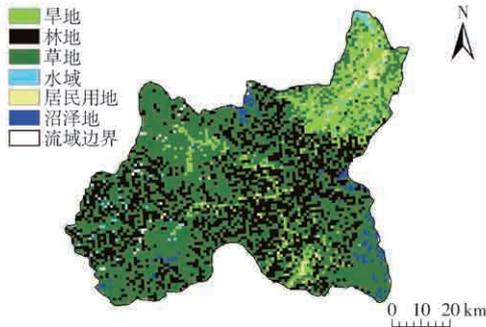


图 4 土地利用类型图

Fig. 4 Land use type map

表 2 不同土地利用类型下的 C_N

Tab. 2 Value of C_N under different land use types

土地利用类型	不同水文土壤组			
	A	B	C	D
旱地	68	77	83	89
林地	38	58	70	77
草地	49	69	79	84
水域	100	100	100	100
居民用地	64	75	81	85
沼泽地	77	86	91	94

测流域等线体,当改变正方形的边长时,被测线体的网格数必然会出现相应的变化^[24-25],因此,拟合方程式为

$$\ln N(a) = -D \ln a + C \quad (5)$$

式中 a ——边长 $N(a)$ ——网格数

C ——比例常数

D ——流域的分维数

1.5.4 地势起伏比的计算

径流是流域地貌形成的外营力之一,并且参与地壳中的地球化学过程,不仅影响植物的生长和湖泊、沼泽的形成,还影响土壤的发育程度。流域分维值又能够很好地反映流域地貌形态^[26],应用流域分维值拟合径流存在可行性。应用 ArcGIS 计算和大夏河流域形态相似的流域水文站的分维值,并计算

该水文站的径流量。

由于研究区域所处的地势起伏度比较大,对地表径流量的影响也比较大,所以需要从 ArcGIS 中获取该研究区域最大与最小高程,然后计算地势起伏比,从而将分维值乘以地势起伏比进行归一化,公式为

$$R_m = \frac{H_{\min}}{H_{\max}} \quad (6)$$

式中 R_m ——地势起伏比

H_{\max} ——研究区域的最大高程

H_{\min} ——研究区域的最小高程

1.5.5 相似流域的识别模型

1.5.5.1 结构相似性

先分流域生成图像的像素分布函数,再通过分布函数的相似性,得到两幅图像的相似度。若用 1 表示图像中被点出的点,用 0 表示图像中未被点出的点,那么,该图像其实就是一个由 1 和 0 组成的 0-1 矩阵。该图像转换成 0-1 矩阵后可应用 Matlab 进行操作。因此,各个图像的结构相似问题就转换为比较矩阵的不同区域之间的相似性问题^[27]。大夏河流域以及与大夏河流域比较相似的 9 个流域的图像如图 5 所示。

为了比较两幅图像的相似程度,可以定义任一图像的像素分布函数。设一幅图像 F 的 0-1 矩阵为 M 。定义向量

$$v_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_{jk} \quad (7)$$

式中 v_k ——图像的竖直像素分布向量

m_{jk} ——矩阵 M 中 j 行 k 列的元素

由此,定义函数

$$f\left(\frac{k}{n}\right) = \frac{v_k}{n} \quad (1 \leq k \leq n) \quad (8)$$

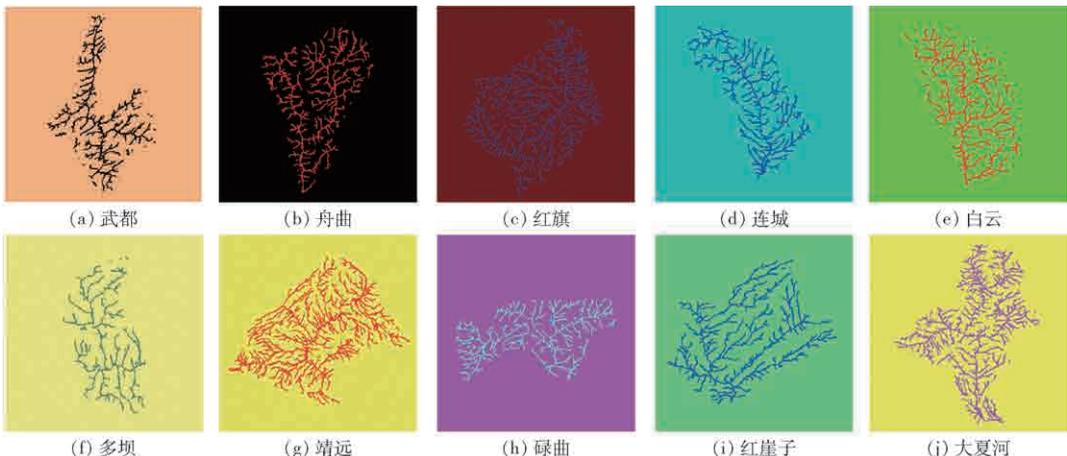


图 5 相似流域图像

Fig. 5 Similar watershed image

式中 k ——矩阵的维数

$f(k/n)$ ——图像 F 的像素分布函数

根据式(8)的定义,可得到函数 $f(x)$ 在 $x = k/n$ 点的值。因为每幅图像的宽度为 230 像素,高度为 230 像素,所以 $1 \leq k \leq 230$ 。

$$T = (u_1, u_2, \dots, u_{230}) \quad (9)$$

式中 T ——向量 F 的特征向量

u_k ——函数 $f(x)$ 在区间 $(0.01(k-1), 0.01k)$ 的平均值

假设两幅图像为 F_1 和 F_2 ,它们对应的 0-1 矩阵为 M_1, M_2 ,对应的特征向量分别为 T_1, T_2 ,由此定义

$$\alpha = \frac{\langle T_1, T_2 \rangle^2}{\langle T_1, T_1 \rangle \langle T_2, T_2 \rangle} \quad (10)$$

式中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ——两个向量的内积

α ——两幅图像的结构相似度

如果 α 大于 0.99,说明两幅图像结构相似。

1.5.5.2 特征相似性

相似流域的识别不仅在结构上比较相似,在流域面积、河网长度、年平均气温、年平均降水量等某些特征指标方面也具有相似性^[28]。表 3 对比了大夏河流域及与大夏河相似的 9 个流域的一些特征参数。

表 3 相似流域的特征对比

Tab.3 Characteristic comparison of similar basins

流域名称	流域面积/ km ²	河网长度/ km	流域面积 与河网长 度比/km	年平均 气温/°C	年平均 降水量/ (mm·a ⁻¹)
白云	2 894.23	875.74	3.30	7.4	568
多坝	1 656.01	524.33	3.16	5.5	536
红旗	8 650.34	3 307.20	2.62	7.5	494
红崖子	2 820.51	1 083.93	2.60	9.7	312
靖远	6 750.73	2 743.31	2.46	9.4	224
连城	3 311.12	1 199.82	2.76	5.8	323
碌曲	3 739.22	1 279.63	2.92	2.9	593
武都	3 115.42	893.29	3.49	14.9	461
舟曲	4 490.71	1 375.72	3.26	13.4	420
大夏河	6 785.01	2 455.40	2.76	4.8	504

2 结果与分析

2.1 水溶出率

采用 BCR 连续分级提取法^[29],将水溶态和可交换态合并的酸溶态含量(质量比)作为水溶出率计算因子,在提取过程中可保持稳定,准确地描述污染物的运移能力。以 5 组土壤重金属样本作为测试提取对象,得到平均提取量和水溶出率如表 4 所示。

表 4 BCR 提取水溶态含量和水溶出率结果

Tab.4 BCR extraction results of water soluble content state and water dissolution rate

参数	Pb	Cd	Cu	Cr	As
全量检测值/(mg·kg ⁻¹)	17	0.043	21	50	4.7
酸溶态含量/(mg·kg ⁻¹)	0.95	0.003 15	0.8	1.6	0.08
水溶出率	0.056	0.073	0.039	0.032	0.017

2.2 重金属含量特征

由于流域位于甘肃省境内,因此采用按行政区划划分的甘肃省土壤背景值的几何平均值作为参考^[30],并对数据进行描述性统计分析,结果如表 5 所示。

表 5 重金属含量描述性统计分析

Tab.5 Descriptive statistical analysis of heavy

metal content

重金属元素	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差/ (mg·kg ⁻¹)	变异 系数	背景值/ (mg·kg ⁻¹)
Cu	20.25	3.661 7	0.180 9	22.5
As	20.43	5.394 0	0.264 0	11.7
Cr	94.48	29.013 5	0.307 1	69.3
Cd	1.43	0.186 7	0.130 2	0.110 6
Pb	15.37	1.182 5	0.076 9	17.9

从表 5 可以看出,5 种重金属元素的平均含量从大到小依次为:Cr、As、Cu、Pb、Cd。

2.3 分维值模拟径流量结果

阈值对应的是区域的汇流量,也就是汇入该区域的栅格流量数,本文在 ArcGIS 10.4 中对该水系的矢量图取 5 000 的阈值,并对该矢量图进行要素转栅格、网格分析,在输入像元大小(正方形网格边长)里填入 10~500 不同的 10 组数值,得到不同边长所对应的栅格图,统计栅格图的网格数,对求得的数值取对数进行线性拟合,生成拟合方程为 $\ln N(a) = -1.016 3 \ln a + 14.331$,决定系数 $R^2 = 0.999 8$,拟合方程系数的斜率即为流域的分维值,故大夏河流域的分维值为 1.016 3,小于 1.6,判定大夏河流域地貌处于幼年期,此阶段流域水系发育不充分,地面较为完整。同理,分别计算 7 个子流域的分维值。

与大夏河流域比较相似的 9 个流域,其分维值基本与大夏河各子流域分维值相近,且某些特征指标也较为相近,所以求得相似流域分维值与径流量如表 6 所示。

对这 9 个水文站的归一化分维值和径流量做线性拟合,得到拟合曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,相似流域分维值和径流量拟合方程为: $y = -8.3 \times 10^9 x + 6.1 \times 10^9$,决定系数 $R^2 =$

表 6 相似流域分维值和径流量

Tab. 6 Similar basin fractal dimension and runoff

流域名称	分维值	最大高程/m	最小高程/m	地势起伏比	归一化分维值	年径流量/m ³
武都	1.005 1	4 575	924	0.202 0	0.203 0	5.275 6 × 10 ⁹
舟曲	1.009 3	4 188	1 052	0.251 2	0.253 5	4.033 9 × 10 ⁹
红旗	0.988 0	4 244	1 676	0.394 9	0.390 2	3.475 0 × 10 ⁹
连城	1.014 0	4 282	1 789	0.417 8	0.423 6	2.715 0 × 10 ⁹
白云	1.008 2	4 648	2 144	0.461 3	0.465 1	6.869 0 × 10 ⁸
多坝	1.011 6	4 804	2 428	0.505 4	0.511 3	5.374 0 × 10 ⁸
靖远	1.009 9	1 976	1 381	0.698 9	0.705 8	1.056 0 × 10 ⁸
碌曲	1.003 9	4 401	3 107	0.706 0	0.708 7	8.254 0 × 10 ⁸
红崖子	1.009 8	1 996	1 554	0.778 6	0.786 2	2.528 0 × 10 ⁸

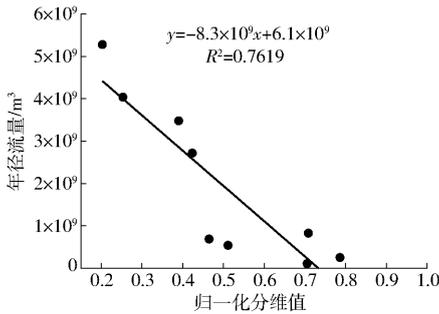


图 6 归一化的分维值和径流量拟合曲线

Fig. 6 Normalized fractal dimension and runoff fitting curve

0.761 9,说明流域分维值和径流量相关性比较显著,该研究方法具有可行性。

根据拟合曲线求大夏河各个子流域的径流量,如表 7 所示。

从全国水雨情网站获取水文站的流量数据,以及从甘肃省水利厅官网下载《甘肃省水资源公报》,查询到折桥和夏河水文站的平均年径流量分别为 7.265 亿 m³和 3.817 亿 m³(2016 年和 2017 年),模拟的年径流量与实测数据基本吻合,说明用分维值模拟的径流数据可以真实反映流域径流量。

表 7 大夏河流域模拟径流量

Tab. 7 Simulating runoff in Daxia river basin

水文站	归一化分维值	年径流量/m ³
桑科	0.729 9	2.590 0 × 10 ⁷
同仁	0.724 0	7.470 0 × 10 ⁷
夏河	0.634 5	8.208 0 × 10 ⁸
合作	0.620 5	9.372 0 × 10 ⁸
甘加	0.548 2	1.539 3 × 10 ⁹
双城	0.454 5	2.068 5 × 10 ⁹
折桥	0.662 5	5.874 0 × 10 ⁸
大夏河	0.388 5	2.870 3 × 10 ⁹

2.4 流域相似度的计算

先对大夏河流域以及与大夏河流域比较相似的 9 个流域的图像进行旋转与裁剪,使每幅流域图像的宽度为 230 像素,高度为 230 像素。进而在 Matlab R2014a 中,把各个流域的图像导入并转换成 0-1 矩阵,再把数据导出,最后通过相似流域的识别模型进行计算。

根据相似流域的识别模型可以求得结构相似度 α ,如表 8 所示。

表 8 流域相似度

Tab. 8 Watershed similarity

	舟曲	白云	多坝	红旗	红崖子	连城	靖远	碌曲	武都	大夏河
大夏河	0.997 6	0.997 5	0.997 3	0.998 4	0.998 8	0.998 5	0.997 8	0.995 8	0.996 3	1
武都	0.999 0	0.999 1	0.999 4	0.997 1	0.998 4	0.998 9	0.998 5	0.997 9	1	0.996 3
碌曲	0.997 9	0.998 2	0.998 7	0.996 3	0.999 1	0.998 3	0.997 9	1	0.997 9	0.995 8
靖远	0.998 8	0.998 6	0.998 5	0.998 4	0.998 8	0.999 2	1	0.997 9	0.998 5	0.997 8
连城	0.999 2	0.999 2	0.999 3	0.997 9	0.998 7	1	0.999 2	0.998 3	0.998 9	0.998 5
红崖子	0.998 5	0.998 6	0.998 7	0.997 1	1	0.998 7	0.998 8	0.999 1	0.998 4	0.998 8
红旗	0.997 8	0.997 6	0.997 3	1	0.997 1	0.997 9	0.998 4	0.996 3	0.997 1	0.998 4
多坝	0.999 2	0.999 3	1	0.997 3	0.998 7	0.999 3	0.998 5	0.998 7	0.999 4	0.997 3
白云	0.999 2	1	0.999 3	0.997 6	0.998 6	0.999 2	0.998 6	0.998 2	0.999 1	0.997 5
舟曲	1	0.999 2	0.999 2	0.997 8	0.998 5	0.999 2	0.998 8	0.997 9	0.999 0	0.997 6

从表 8 可以看出,多个流域图块与参考图的结构相似度 α 均大于 0.99(其中相似度为 1 即参考图

所在的区域,是参考图与自身相比的结果),说明大夏河流域以及与大夏河流域比较相似的 9 个流域具

有结构相似性。

通过流域相似度的验证与分析,大夏河流域以及与大夏河流域相似的9个流域在结构上是相似的,并且根据表3可以看出,这些流域在不同尺度下的年平均气温、年平均降水量、流域面积与河网长度比值也具有相似性。

2.5 两种模型对比

根据SCS-CN模型估算出大夏河流域的重金属运移量,如表9所示。

表9 基于SCS-CN模型估算的重金属运移量

Tab.9 Heavy metal migration estimated based on SCS-CN model t/a

子流域 名称	重金属元素				
	As	Cd	Cr	Cu	Pb
同仁	0.032 8	0.012 4	0.381 2	0.071 5	0.082 3
桑科	0.115 2	0.022 0	0.381 8	0.140 4	0.200 1
夏河	0.067 8	0.013 2	0.314 4	0.102 6	0.111 1
合作	0.133 5	0.047 0	1.777 9	0.393 8	0.377 5
甘加	0.056 4	0.023 4	0.971 7	0.238 2	0.204 9
双城	0.126 3	0.041 3	0.957 0	0.356 2	0.420 4
折桥	0.094 8	0.038 0	1.021 1	0.293 3	0.317 8
合计	0.626 8	0.197 3	5.805 1	1.596 0	1.714 1

SCS-CN模型的优点在于结构简单、输入参数少,缺点在于数据需要长期持续性观测。从表9可以看出,大夏河各个子流域的重金属运移量,As、Cd、Cr、Cu、Pb 5种重金属的总运移量为0.626 8、0.197 3、5.805 1、1.596 0、1.714 1 t/a。

根据分布式预测模型估算出大夏河流域的重金属运移量,如表10所示。

分布式运移模型优点在于从机理上去除了重金属河道滞留量和土壤入渗保留量,可以结合少量采样数据对远程遥感进行估算,缺点在于需要根据实际区域的土壤颗粒类型和水土保持因子来做进一步的剔除。从表10可以看出,大夏河各个子流域的重金属运移量,As、Cd、Cr、Cu、Pb 5种重金属的总运移量为0.671 0、0.209 9、6.281 6、1.746 5、1.837 7 t/a。

表10 基于分布式模型估算的重金属运移量

Tab.10 Heavy metal migration based on distributed model estimation t/a

子流域 名称	重金属元素				
	As	Cd	Cr	Cu	Pb
同仁	0.038 9	0.014 7	0.452 8	0.084 9	0.097 7
桑科	0.073 0	0.014 0	0.241 8	0.088 9	0.126 7
夏河	0.139 3	0.027 0	0.645 4	0.210 6	0.228 1
合作	0.090 7	0.032 0	1.207 5	0.267 5	0.256 3
甘加	0.104 3	0.043 3	1.797 9	0.440 8	0.379 1
双城	0.151 7	0.049 6	1.149 4	0.427 8	0.504 9
折桥	0.073 1	0.029 3	0.786 8	0.226 0	0.244 9
合计	0.671 0	0.209 9	6.281 6	1.746 5	1.837 7

对比表9、10可以看出,应用分维值估算的径流量分布式模型求取的重金属运移量和应用SCS-CN模型求取的重金属运移量结果基本一致,说明分布式重金属运移模型相对合理。

3 结论

(1) Cu、Pb元素的实测平均含量分别为20.25、15.37 mg/kg,分别低于甘肃省Cu、Pb含量的地方背景值22.5、17.9 mg/kg,说明这两种元素没有超标。As、Cr、Cd元素的实测平均含量分别为20.43、94.48、1.43 mg/kg,分别高于甘肃省As、Cr、Cd含量的地方背景值11.7、69.3、0.110 6 mg/kg,说明这3种元素在大夏河流域存在不同程度的历史累积。

(2)采用网格法对大夏河流域及其子流域进行分析,其水系分维值为1.016 3。根据相似流域水文站的分维值和径流数据,计算分维值与径流量之间的线性关系,拟合曲线求出大夏河子流域的径流数据,对大夏河流域及与大夏河流域比较相似的9个流域的相似性进行了建模验证。

(3)基于SCS-CN和分布式运移两种模型的估算结果基本一致,但总体上应用分布式运移模型估算重金属的运移量偏高,比例较为合理,尤其对于远程遥感估算更具有实际应用前景。

参 考 文 献

- [1] RODE M, ARHONDITSIS G, BALIN D, et al. New challenges in integrated water quality modelling [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(24): 3447-3461.
- [2] AL-MUR B A, QUICKSALL A N, AL-ANSARI A M A. Spatial and temporal distribution of heavy metals in coastal core sediments from the Red Sea, Saudi Arabia [J]. *Oceanologia*, 2017, 59(3): 262-270.
- [3] CHO Y, ENGEL B A, MERWADE V M. A spatially distributed Clark's unit hydrograph based hybrid hydrologic model (Distributed-Clark) [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(10): 1519-1539.
- [4] MEDIERO L, GARROTE L, MARTIN-CARRASCO F J. Probabilistic calibration of a distributed hydrological model for flood forecasting [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1129-1149.
- [5] UNDUICHE F, TOLOSSA H, SENBETA D, et al. Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(8): 1133-1149.
- [6] 张荣. 大夏河流域水文与环境特征分析 [J]. *甘肃农业*, 2009(11): 61-63.

- ZHANG Rong. Analysis of hydrological and environmental characteristics of Daxia river basin[J]. Gansu Agriculture, 2009(11): 61–63. (in Chinese)
- [7] 李小荣. 大夏河流域水文特性分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(7): 17–18, 53.
LI Xiaorong. Analysis of hydrological characteristics of Daxia river basin[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2010, 46(7): 17–18, 53. (in Chinese)
- [8] 余杰, 左小清, 唐从国. 滇池 SRTM DEM 数据的流域特征自动提取[J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 189–191.
YU Jie, ZUO Xiaoqing, TANG Congguo. Watershed feature extraction from SRTM DEM data in Dianchi lake[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(2): 189–191. (in Chinese)
- [9] 周晨霓, 任德智. 基于 DEM 的西藏鲁朗河流域数字河网提取时集水面积阈值的确定[J]. 中国农村水利水电, 2014(10): 49–52.
ZHOU Chenni, REN Dezhi. Determination of drainage area threshold for extraction of DEM-based digital drainage networks in the Lulang river of Tibet[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(10): 49–52. (in Chinese)
- [10] PASTOR-MARTIN C, ANTON L, FERNANDEZ-GONZALEZ C. Flunets: a new Matlab-based tool for drainage network ordering by horton and hack hierarchies[J]. Geographia Technica, 2018, 13(2): 114–124.
- [11] 徐亚菲, 李向新, 赖金富, 等. 基于 DEM 和 ArcGIS 的水文信息提取方法研究[J]. 科技情报开发与经济, 2008(6): 135–136.
XU Yafei, LI Xiangxin, LAI Jinfu, et al. Research on the hydrologic information extraction based on DEM and ArcGIS[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2008(6): 135–136. (in Chinese)
- [12] 黄娟, 申双和, 殷剑敏. 基于 DEM 的江西潦河流域河网信息提取方法[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(1): 49–53.
HUANG Juan, SHEN Shuanghe, YIN Jianmin. Drainage network extraction in Liaohe based on DEM[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2008, 31(1): 49–53. (in Chinese)
- [13] 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 农田土壤重金属季节性变化周期研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 56–61.
WANG Shengwei, FENG Juan, LIU Gang, et al. Seasonal variation with periodic analysis in soil heavy metals[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 56–61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130911&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.011. (in Chinese)
- [14] 杨可明, 程龙, 郭辉, 等. 铜胁迫下玉米叶片的 HHT 包络谱变化与污染预测模型[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 168–176.
YANG Keming, CHENG Long, GUO Hui, et al. Changes of HHT envelope spectra and pollution prediction models on corn leaves polluted by copper stress[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 168–176. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180721&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.021. (in Chinese)
- [15] RIZEEI H M, PRADHAN B, SAHARKHIZ M A. Surface runoff prediction regarding LULC and climate dynamics using coupled LTM, optimized ARIMA, and GIS-based SCS–CN models in tropical region[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(3): 53.
- [16] CHANG M, CROWLEY C M. Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1993, 29(5): 777–783.
- [17] 武升, 张俊森, 管飞, 等. 安徽省巢湖流域众兴水库小流域农业面源污染调查与评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 198–203.
WU Sheng, ZHANG Junsen, GUAN Fei, et al. Investigation and evaluation of agricultural non-point source pollution in Zhongxing reservoir small watershed of Chaohu Lake Basin, Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 198–203. (in Chinese)
- [18] MISHRA S K, SINGH V P, SANSALONE J J, et al. A modified SCS–CN method: characterization and testing[J]. Water Resources Management, 2003, 17(1): 37–68.
- [19] 王冬, 李丽, 王加虎, 等. 径流曲线数(SCS–CN)模型在洪水预报中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 108–112.
WANG Dong, LI Li, WANG Jiahu, et al. Application of SCS–CN model in flood forecasting[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 108–112. (in Chinese)
- [20] DOBROVOL' SKII S G. Incorporating natural changes in global climate in very-long-range forecasting of river runoff[J]. Water Resources, 2018, 45(4): 437–446.
- [21] GIRES A, ABBES J B, PAZ I D S R, et al. Multifractal characterisation of a simulated surface flow: a case study with multi-hydro in Jouy-en-Josas, France[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 482–495.
- [22] TEEGAVARAPU R S V, CHINATALAPUDI S. Incorporating influences of shallow groundwater conditions in curve number-based runoff estimation methods[J]. Water Resources Management, 2018, 32(13): 4313–4327.
- [23] 张天蛟, 刘刚, 王圣伟. 基于 GIS/RS 的不同土地利用类型重金属面源污染比较[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 124–132.

- ZHANG Tianjiao, LIU Gang, WANG Shengwei. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 124 - 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s121&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.021. (in Chinese)
- [24] 许斌, 谢贤健, 甄英. 基于 DEM 和分形理论的沱江流域划分及河网提取[J]. 水电能源科学, 2018, 37(7): 19 - 22.
XU Bin, XIE Xianjian, ZHEN Ying. Extraction of watershed characteristics of Tuojiang basin based on DEM and fractal theory [J]. Water Resources and Power, 2018, 37(7): 19 - 22. (in Chinese)
- [25] 杨永侠, 孙婷, 张丽红, 等. 京津冀地区耕地质量空间分布分形机制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 165 - 171.
YANG Yongxia, SUN Ting, ZHANG Lihong, et al. Fractal mechanism of spatial distribution of arable land quality in Beijing - Tianjin - Hebei region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 165 - 171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170222&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.022. (in Chinese)
- [26] 王倩, 邹欣庆, 朱大奎. 基于 GIS 技术的秦淮河流域水系分维研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 751 - 756.
WANG Qian, ZOU Xinqing, ZHU Dakui. On the dimensions of Qinhuai river networks based on the GIS technology[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6): 751 - 756. (in Chinese)
- [27] 郭兆纲, 胡振鹏. 不同周期数据递归图中的类分形自相似结构研究[J]. 统计与决策, 2016(11): 151 - 153.
GUO Zhaogang, HU Zhenpeng. Research on class fractal self-similar structure in recursion graph of data with different periods [J]. Statistics and Decision, 2016(11): 151 - 153. (in Chinese)
- [28] 王彬, 邱景. 基于分形理论的小流域相似性判别初探[J]. 吉林水利, 2010(2): 48 - 50.
WANG Bin, QIU Jing. Discussion on the similarity of small-sized basin based on fractal theory[J]. Jilin Water Resources, 2010(2): 48 - 50. (in Chinese)
- [29] FERNÁNDEZ-ONDOÑO E, BACCHETTA G, LALLENA A M, et al. Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 172: 133 - 141.
- [30] 赵斌, 朱四喜, 杨秀琴, 等. 草海湖沉积物中重金属污染现状及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 235 - 245.
ZHAO Bin, ZHU Sixi, YANG Xiuqin, et al. Pollution status and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Caohai Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(2): 235 - 245. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 321 页)

- [38] 肖继兵, 孙占祥, 杨久廷, 等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 709 - 714.  
XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, YANG Jiuting, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 709 - 714. (in Chinese)
- [39] 廖青, 韦广泼, 陈桂芬, 等. 蔗叶还田对土壤微生物、理化性状及甘蔗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2): 658 - 662.  
LIAO Qing, WEI Guangpo, CHEN Guifen, et al. Effect of trash returning on microbial communities, physical and chemical properties of soil and plant growth of sugarcane[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(2): 658 - 662. (in Chinese)
- [40] 张丽娜, EVANS A, 张陆勇, 等. 耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 46 - 50.  
ZHANG Li'na, EVANS A, ZHANG Luyong, et al. Effects of tillage methods on the physical characteristics of red soil of upland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 46 - 50. (in Chinese)
- [41] 陈恩凤. 耕翻深度与耕层的层次发育[J]. 中国农业科学, 1962, 2(12): 1 - 6.  
CHEN Enfeng. Plowing depth and layer development of cultivated-layer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1962, 2(12): 1 - 6. (in Chinese)
- [42] 黄国勤, 周丽华, 杨滨娟, 等. 红壤旱地不同复种方式养地效果[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5191 - 5199.  
HUANG Guoqin, ZHOU Lihua, YANG Binjuan, et al. Improving soil fertility with different multiple cropping patterns in upland red soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5191 - 5199. (in Chinese)