DOI: 10.5846/stxb201503190529

刘晓君,李占斌,李鹏,张铁钢,徐国策,高海东.基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究.生态学报,2016,36(18): - . Liu X J, Li Z B, Li P, Zhang T G, Xu G C, Gao H D.Land use/cover change based relationship between landscape, runoff, and sedimentation. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应 关系研究

刘晓君1,李占斌1,2,*,李鹏2,张铁钢2,徐国策2,高海东2

1 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100
2 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室,西安 710048
3 陕西省水土保持局,西安 710004

摘要:以黄河流域的2个典型流域为研究对象,借助 GIS和 Fragstats 平台与长系列水沙数据,分析流域景观格局和水沙变化特征,并探讨景观指数与径流输沙的关系。结果表明:(1)两个流域优势景观类型为草地,1985—2010年间变化最大的景观类型分别为未利用土地(25年变幅为453.94 km²)和耕地(25年变幅为52.85 km²);(2)秃尾河流域景观均向规则、高连通和高度聚集的方向发展。孤山川控制流域内景观多样性和聚集度逐渐增加,整体向好。秃尾河流域景观稳定性指数高于孤山川流域,两流域草地和未利用土地地稳定性均呈增加趋势,而城乡工矿用地则相反。(3)流域年径流量和泥沙量均呈现逐年同步减小的趋势。秃尾河年径流量明显高于孤山川,但孤山川流域泥沙量与秃尾河流域相近。两流域径流泥沙相关关系显著,秃尾河流域相关系数(0.48)明显低于孤山川流域(0.85)。(4)景观指数与径流量、泥沙量呈显著线性相关,其中景观多样性相关的指数SHDI、SIDI、SHEI和 SIEI 均与径流呈极显著正相关,而泥沙仅与 CONTAG、COHESION 呈显著负相关。 关键词:土地利用/覆被变化;景观格局;径流量;输沙量;黄河流域

Land use/cover change based relationship between landscape, runoff, and sedimentation

LIU Xiaojun¹, LI Zhanbin^{1,2,*}, LI Peng², ZHANG Tiegang², XU Guoce², GAO Haidong²

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area at XAUT, Xi'an 710048, China

3 Shaanxi Provincial Bureau of Soil and Water Conservation, Xi'an 710004, China

Abstract: Serious soil erosion by the Yellow River has not only led to ecological deterioration, but also heightened the risk of floods downstream. Land use change is the main factor responsible for the ecological and environmental issues. Sedimentation and runoff variation caused by land use change has emerged as one of the popular topics of discussion. Researchers usually select landscape pattern as an important indicative factor of land use for analyzing the tense relationship between the socioeconomic system and natural ecosystem. The purpose of this study was to determine the characteristics of landscape patterns, runoff, and sedimentation changes, and discuss the relationship between landscape indices (LIs), runoff, and sedimentation. Two typical watersheds (Tuweihe and Gushanchuan watersheds) in the Yellow River basin were selected as the study sites. Long-term historical land use, runoff, and sediment data (1985—2010) were analyzed relying on geographic information system and Fragstats software. Landscape indices included NP (number of patches), PD (patch density), LPI (largest patch index), LSI (landscape shape index), PAFRAC (perimeter area fractal dimension), CONTAG (contagion index), COHESION (patch cohesion index), DIVISION (landscape division index), and SHDI (Shannon's diversity index). The following results were obtained: (1) Grassland was the dominant landscape in the two

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41330858);国家科技支撑计划专题(2011BAD31B01);国家自然科学基金(41471226)

收稿日期:2015-03-19; 网络出版日期:2015-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanbinli@126.com

watersheds. Unused land in Tuweihe watershed and farmland in Gushanchuan watershed experienced the greatest changes with areas of 453.94 km² and 52.85 km², respectively, from 1985 to 2010. Deforestation and reconversion of cultivated land to forest and grassland were the main reasons for the land cover change. (2) The calculation of coefficient of variation (CV) revealed that LPI of Tuweihe watershed had intermediate variability (CV = 27.29%), while all the others including LIs of Gushanchuan watershed had little variability (CV < 10%). The landscape in Tuweihe watershed tended to become regular, connected, and aggregate, indicating that with time, the influences of human activities on the area were growing. The diversity and aggregation index increased and the landscape pattern improved. For grassland and unused land, the landscape stability had been increasing gradually but decreased as farmland and urban and rural land became increasingly affected by human activities. The landscape stability of Tuweihe watershed was higher than that of Gushanchuan watershed. (3) The annual runoff and sediments decreased gradually. The runoff in Tuweihe watershed was greater than that in Gushanchuan watershed, and the sediment yields of the two watersheds were similar owing to the bigger area of farmland in Gushanchuan watershed and more check dams in Tuweihe watershed. A Pearson correlation analysis showed that there was a significant relationship between annual runoff and sedimentation (P < 0.01). The coefficient of determination in Tuweihe watershed (0. 48) was obviously lower than that in Gushanchuan watershed. (4) The Pearson correlation analysis showed that the LIs were in significant linear relationship with runoff and sedimentation (P < 0.01). SHDI, SIDI, SHEI, and SIEI were positively correlated with annual runoff, whereas CONTAG and COHESION were negatively correlated with annual sedimentation. Compared to annual sedimentation, the correlation coefficients for LIs and runoff were higher, indicating that the land use/cover change affected runoff more than it affected sedimentation. Our results suggest that discussing the relationship between the LIs and runoff and sedimentation could provide scientific basis for the prevention and treatment of water loss and soil erosion.

Key Words: land use/cover change; landscape; runoff; sedimentation; Yellow River

土地利用/覆被变化被认为是对流域水量平衡及水文循环过程造成影响的关键因素之一^[1-2]。它通过拦 截降雨、径流,提供枯枝落叶^[3],改变地表蒸散发量等影响土壤性质及土地生产力,从而直接干预或间接影响 水文生态过程,使水土资源在时空上发生数量及质量的变化^[4]。特别是新中国以来,人类活动日益频繁,流 域内不合理的土地利用如毁林开荒、陡坡开垦等都会引起或加剧水土流失、土地退化和地质灾害。研究土地 利用覆被格局/变化,对认识流域水沙变化特征及生态环境稳定性和水土资源可持续利用具有重要的现实意 义。因此,由土地利用/覆被变化引起的环境效应成为领域内的热点问题,包括数理统计学^[5-6]、GIS 与 RS 技 术^[7]、景观生态学^[8-9]、模型^[10]等方法的应用,为该问题提供了丰富的实践与理论参考。而针对水土流失问 题,从景观格局的角度研究流域水沙问题的相对较少,王兮之等人^[11]分析了黄河中游泾河流域水沙变化特点 和景观格局特征,但并未建立景观指数与水沙的关系。

干旱半干旱地区受地理、气候和人类活动的影响,生态环境脆弱,水土资源稀缺,景观格局分配不合理和 人为干扰造成一系列生态环境负效应^[12],亟需加强对地区水土流失及景观格局方面的研究,探讨其径流泥沙 规律及影响因素,为水土资源合理开发利用提供科学依据。为此,我们选择黄河流域的典型流域(秃尾河和 孤山川流域),分析 1956年—2010年间流域土地利用及景观格局变化,并建立其与年径流、泥沙的关系,以期 为流域生态环境问题和农业可持续发展提供理论支持。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

秃尾河和孤山川是黄河中游右岸的两条一级支流(图1),在北纬38°18′—39°26′和东经109°26′和110°5′ 之间,面积分别为4503.40km²和1263.11km²。在行政区划上,秃尾河流域包括陕西省神木县、榆林市、佳县和 内蒙古伊金霍洛旗的部分乡镇,孤山川流域包括陕西省府谷县和内蒙古准格尔旗的部分乡镇。流域海拔为 743—1517m,均为西北高东南低,受北温带干旱半干旱大陆性季风气候影响。秃尾河流域和孤山川流域年均 气温分别为8.5℃和7.3℃,多年平均降雨量分别为417.4 mm和430mm,降雨集中于夏季,且蒸发较大,高强度 暴雨是流域内产流产沙的主要原因。流域属黄土高原丘陵沟壑区,第四纪黄土广泛分布,水蚀风蚀都较严重,发育成熟的沟谷被切割较深,侵蚀模数分别达 2244 和 3299t km⁻² a⁻¹。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与处理

DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://datamirror.csdb.cn);该数据 集利用 ASTER GDEM 第一版本(V1)的数据进行加工得 来,是 30 米空间分辨率,投影为 UTM 的数字高程数据产 品。数据下载后利用 ERDAS9.1 软件进行拼接和裁剪,生 成研究区 DEM。对生成的流域 DEM 进行填挖预处理、水 流流向生成、提取河网、生成控制流域。1985—2010 年径 流及泥沙数据来自于流域出口水文站点监测值。

本研究采用中国 1:10 万土地利用数据(1985 年、1996 年、2000 年和 2010 年共四期),下载于国家自然科学基金 委员会"中国西部环境与生态科学数据中心"(http:// westdc.westgis.ac.cn),该数据是在"八五"中科院重大项目 "全国环境遥感宏观调查与动态研究"(96—B02—01)生 产的,应用 Landsat MSS,TM 和 ETM 信息源,主要通过全国 各地的相关专家根据对图像光谱、纹理、色调等的认识结





合地形图目视解译而成。该数据库经过了野外实地考察验证,精度达到95%^[11-14]。

由于研究区域范围相对较大,为了景观变化指标讨论的科学性和可操作性,对土地利用分类中的二级地 类进行合并,建立了六大类土地景观类型的 GIS 数据库,即把控制流域的土地景观类型分为耕地、林地、草地、 水域、城镇居民建设用地和未利用地。随后运用 ArcGIS 系统,在 Spatial Analyst 空间分析模块支持下,将土地 利用矢量数据转换为 30 米分辨率的栅格数据,以备随后分析计算使用。

1.2.2 分析方法

用景观指数描述景观格局及其变化,建立格局与景观过程之间的联系,是景观生态学最常用的定量化研究方法^[15-16]。

影响景观格局指数有效性的因素不仅包括尺度效应、数据源准确度、生态意义可解释性和相关性等4个 被普遍关注的方面,还包括土地利用分类的不确定性,即同一景观采用不同的土地利用分类方案将产生不同 的景观格局,从而导致景观格局指数相应发生变化^[17]。

应用景观格局分析软件 FRAGSTAT3.3,对流域的土地利用景观空间格局特征参数进行分析,并计算相关的景观指标。计算方法参照了《FRAGSTATS 3.3 操作手册》,FRAGSTATS 是美国俄勒冈州立大学开发的一个景观指标计算软件,可以计算 50 多种景观指标,这些指标被分为三组级别,分别代表三种不同的应用尺度:① 斑块块级别(patch-level):反映景观中单个拼块的结构特征,是计算其他级别景观指数的基础;②斑块类型(class-level)级别指数:反映景观中不同拼块类型的结构特征;③景观类型(landscape-level)级别指斑块数:反映景观的整体结构特征。因此,本文在景观级别上分析景观指标,并选取斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑状指数(LSI)、周长-面积分维数(PAFRAC)、蔓延度指数(CONTAG)、斑块结合度(COHESION)、景观分割度(DIVISION)、Shannon 多样性指数(SHDI)和聚集度(AI)等指标。上述指标分别反映了斑块的面积、密度、邻近度、多样性和聚散性,具体指数的计算方法与生态学意义详见相关文献^[18]和表1。

	Table 1 The formula and ecological significa	ace of the landscape indices	
景观指数 Landscape index	计算公式 Formula	物理意义 Physical significance	生态学含义 Ecological significance
斑块个数 Number of Patches	NP=N	N 为整个景观的斑块总数(个)	景观中斑块的总个数
斑块密度 Patch Density	$PD = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{M} N_i$	M 为研究范围内某空间分辨率上景观 要素类型总数;A 为研究范围内景观总 面积(个/km ²)	景观被分割的破碎化程度,空间异质性程度,在一定程度上反映人为对景观的干扰 程度,在一定程度上反映人为对景观的干扰 程度。
最大斑块指数 Largest Patch Index	LPI = $\frac{Ma\xi \ a_1, a_2, \dots, a_h}{A} \ \epsilon \ 100$	<i>a_i为斑块 i</i> 的面积, A 为景观总面积(%)	有助于确定景观的模地或优势类型等,其值 得大小决定着景观中优势种、内部种的丰度 等生态特征,其值的变化可以改变干扰的强 度和频度率,反映人类语动的方向和强弱
景观形状指数 Landscape Shape Index	LSI = $\frac{0.2\xi E}{A}$	E为斑块周长,A是斑块面积	值越大斑块的形状越复杂
周长-面积分维数 Perimeter Area Fractal Dimension	$PAFRAC = \frac{2}{\left[\begin{array}{ccc}n_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\int_{j=1}^{n}\left(\ln P_{ij}\times \ln A_{j}\right) & \left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln P_{j}\right)\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln A_{j}\right)\right]} \\ \left(\begin{array}{ccc}n_{i}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln P_{j}\right) & \left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\ln P_{j}\right) \\ \end{array}\right)$	P _i 为i类型在整个景观中所占的比例, _{Sik} 为i和k类型中相邻的斑块数,m为 总景观类型的数目	值越大斑块类型的形状越复杂,斑块的破碎 程度也就较大
蔓延度指数 Contagion Index	$\text{CONTAG} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} P_j & P_j & \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m}} \times lk & p_i & \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m}} \\ 1 + \frac{2lk & m}{2lk & m} & \end{bmatrix} \times 100$	M 为斑块类型总数,Pi;为随机选择的 两个相邻栅格细胞属于类型;和j的概 率(%)	景观里不同拼块类型的团聚程度或延展 趋势
斑块结合度 Patch Cohesion Index	COHESION = $\left(\begin{array}{c} 1 & -\frac{\sum_{j=1}^{m} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} P_{ij}} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} 1 & -\frac{1}{A} \end{array} \right)^{-1} \xi 100$	P _i 为 <i>j</i>	某一种斑块类型和周围相邻斑块类型的空 间连核程度
景观分割度 Landscape Division Index	DIVISION = $\begin{bmatrix} 1 - \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \end{bmatrix}$	a _{ij} 为第 i 类景观 j 斑块的面积, A 为总 面积	景观的破碎化程度
香浓多样性指数 Shannon's Diversity Index	SHDI = $-\sum_{i=1}^{m} P_i \mathbf{h} \mathbf{h}_i$]	P 为斑块类型所占景观总面积的比例, <i>i</i> 为斑块个数	景观中各类斑块的复杂性和变异性(即景观 异质性),强调稀有斑块类型对信息的贡献

http://www.ecologica.cn

表1 景观格局指数计算公式及其生态学意义

4

36卷

对数据的显著性分析和相关性分析均在 SPSS 软件下实现。

2 结果与分析

2.1 流域土地利用及景观格局分析

2.1.1 土地利用年际变化特征

秃尾河控制流域面积为4503.40km²,其中占最大比例的景观为草地(38.13%—53.49%),其次为未利用 土地(23.08%—37.90%)。1985—2010年,流域内未利用土地面积变化最剧烈,减少了12.49%。25年间有 35.18%(453.94 km²)的未利用土地转化为草地(图2、3),其中仅1985—1996年11年间就有67.28%(512.93 km²)的未利用土地转化为草地;另外有34.75 km²的耕地被退耕为林草地,变化最剧烈的依然是1985—1996 年间(变幅为35.40 km²)。林地发生转移的面积比例最小,25年间仅有5.46%的林地转化为其他景观,这从 其每个阶段占全部控制面积的比例都维持在5.40%—5.52%之间也可以看出。

表 2 流域土地利用年际统计特征 km^2									
Table 2 Annual characteristics of land use in study area km ²)									
土地利用	秃	:尾河流域 Tu	weihe watersh	ed	孤山川流域 Gushanchuan watershed				
Land use	1985 年	1996年	2000年	2010年	1985 年	1996年	2000年	2010年	
耕地 Farmland	1129.26	1134.52	1116.35	1086.42	410.49	405.94	409.21	383.59	
林地 Forest	203.77	201.87	204.74	212.33	60.47	48.41	64.45	72.91	
草地 Grassland	1681.02	2251.95	2124.38	2175.39	772.61	790.87	770.47	785.15	
水域 Water	106.10	105.44	104.98	102.97	12.37	12.82	12.10	12.22	
城乡工矿用地 Urban and rural area	8.70	8.62	9.03	18.65	6.12	4.51	6.32	8.53	
未利用土地 Unused land	1374.55	801.00	943.91	909.61	1.05	0.56	0.56	0.55	



Fig.2 Variation of land use in Tuweihe watershed

孤山川控制流域面积为 1263.11km²,其中草地面积所占比例最大(61.00%—62.61%),其次为耕地(30.37%—32.50%),未利用土地面积占地最小,仅为 0.04%—0.08%。另外,1985—2010 年间,耕地和未利用土地面积逐渐降低,林地、草地及城乡工矿用地面积增加,水域景观的面积在浮动中保持稳定。由表 2 可以看出, 1985—2010 年的 25 年间,各景观中变化面积最大的为耕地,共计 52.85 km²面积转化为其他景观,仅在 2000—2010 年间就有 49.76 km²的耕地转化为林草地;而相对转移率最大的为未利用土地,共有 51.95%的未利用土地转化为其他景观。近年来,不断的毁林开荒和退耕还林还草是 2000—2010 年间各景观间转移面积 较大的原因。



图 3 孤山川流域土地利用变化图 Fig.3 Variation of land use in Gushanchuan watershed

2.1.2 景观格局

1985—2010年四个时期秃尾河和孤山川流域景观指数如表 3 所示。其中秃尾河 LPI 指数年际变化最 大,变异系数 CV 为 27.29%,属中等变异,秃尾河其余指数及孤山川流域各景观指数均属弱变异。经过 ANOVA 分析得两流域景观指数变异系数无显著差异,即各景观指数相对变化幅度相差不大。随着年份的增 加,秃尾河流域斑块数(NP)均逐渐减小,相应的景观连接度(COHESION)和聚集度(CONTAG)增加,这意味 着相同景观类型的斑块经过物种迁移或其他生态过程逐渐融合,形成了较好的连接性。最大斑块指数(LPI) 的增加也证明了这一现象。另外,景观形状指数(LSI)的减小表明越来越多的斑块受到人为活动干扰,形成 了规则简单的斑块形状,而这一行为也导致了边缘面积分维数(PAFRAC)呈现缓慢减小的情况。由土地利用 特征际转移矩阵知,1996年各景观类型转移面积最大,即形成了相当一部分面积的草地景观,因而其香农多 样性指数(SHDI)为最小。孤山川控制流域 LPI、DIVISION 值均在中等偏上水平,即景观优势斑块优势度、分 割度和聚集度等均处于中等偏上;较高的 LSI 值也说明斑块形状较为复杂;COHESION 值均接近 100,即斑块 与相邻斑块类型的空间连接度非常高;SHDI 值均大于 0.85,说明研究区内土地利用丰富,且各斑块类型分布 状况相对均衡。1985—2010年间各景观指数相对稳定,但 SHDI 及 AI 均有不同程度增加,说明孤山川控制流 域内景观多样性和聚集度逐渐增加,整体向好。总之,由于人为活动对流域影响越来越大,景观类型趋于规 则、高连通和高度聚集的方向发展。

			Table 3 A	nnual varia	ations of lar	ndscape indi	ces			
流域 Watershed	时期 Time	NP/ 个	PD/ (个/hm ²)	LPI/%	LSI	PAFRAC	CONTAG/%	COHESION/	′%	DIVISION SHDI
秃尾河 Tuweihe	1985	1393	0.31	20.30	36.48	1.60	36.47	97.79	0.91	1.32
	1996	1332	0.30	41.04	35.32	1.58	39.82	98.72	0.80	1.24
	2000	1343	0.30	37.39	36.16	1.58	38.46	98.60	0.83	1.27
	2010	1340	0.30	34.03	35.94	1.57	38.36	98.44	0.86	1.27
孤山川 Gushanchuan	1985	938	0.74	61.00	37.14	1.68	53.34	99.18	0.62	0.89
	1996	909	0.72	62.50	36.34	1.69	55.22	99.21	0.61	0.85
	2000	959	0.76	60.81	37.27	1.69	53.07	99.17	0.63	0.89
	2010	928	0.74	61.79	35.73	1.68	52.59	99.14	0.62	0.91

表 3	流	域景	观打	旨数	年际变	化特	征 ^①

①标注单位指标为无量纲指数

两流域对比可知,秃尾河流域 PD、LPI、PAFRAC、CONTAG 和 COHESION 值均比孤山川流域小,说明较小的斑块密度及面积(由 LPI 反映)导致了分维数、景观聚集度和连通度均较低。相应的,孤山川流域景观中各类斑块的复杂性和变异性就低于秃尾河流域,即空间异质性及分割度(DIVISION)相对较低。另外,系统结构

的复杂组成使得秃尾河流域土地利用较为丰富,破碎化程度也较高,因而 SHDI 值高于孤山川流域。 2.1.3 景观稳定性

从斑块稳定性指数来看,秃尾河流域耕地、林地和水域的稳定性最高,草地的平均景观稳定性指数最低。 其中又以 2000—2010 年的稳定性指数最低,这期间秃尾河流域城乡工矿用地的斑块特征稳定性指数仅为 0. 409,密度稳定性指数为 0.881;其次为 1985—1996 年秃尾河未利用土地景观密度稳定性指数(0.591)。城乡 工矿用地的稳定性指数均呈现逐渐降低的趋势,进一步说明其受人类活动影响越来越大。而草地和未利用土 地稳定型指数的增加,说明人类在 2000 年以前对该两种景观的干扰及其自身的发展均比较强,导致其 2000 年前稳定性较低。孤山川流域林地的景观稳定性最差,其次为未利用土地及城乡工矿用地,这又以 1985— 1996 年间景观稳定性最差。这可能与 90 年代大面积实行人工造林有关。总体来说,秃尾河流域景观稳定性 指数高于孤山川流域,且随着年份的增加,草地和未利用土地景观稳定性指数逐渐增加,而耕地和城乡工矿用 地景观受人类活动干扰越来越强烈,其稳定性指数均逐渐减小。

	Table 4	ariation characteristic	s of landscape stabilit	У	
星	在心	秃尾沁	可流域	孤山	川流域
水水 Landscape	-+ DJ Vear	Tuweihe	watershed	Gushanchu	an watershed
Lanuscape	1 ear	特征稳定性	密度稳定性	特征稳定性	密度稳定性
耕地 Farmland	1985—1996	0.996	0.995	0.981	0.973
	1996—2000	0.982	0.978	0.989	0.987
	2000—2010	0.952	0.932	0.909	0.881
	1985—2010	0.938	0.914	0.914	0.893
林地 Forest	1985—1996	0.973	0.954	0.621	0.441
	1996—2000	0.965	0.943	-0.089	-0.845
	2000—2010	0.959	0.956	0.705	0.541
	1985—2010	0.952	0.948	0.482	0.169
草地 Grass land	1985—1996	0.687	0.714	0.885	0.791
	1996—2000	0.956	0.967	0.813	0.648
	2000—2010	0.936	0.896	0.910	0.841
	1985—2010	0.683	0.661	0.871	0.761
水域 Water	1985—1996	0.951	0.912	0.962	0.959
	1996—2000	0.984	0.969	0.961	0.978
	2000—2010	0.969	0.955	0.963	0.934
	1985—2010	0.932	0.898	0.994	1.000
城乡工矿用地	1985—1996	0.995	1.000	0.835	0.934
Urban and rural area	1996—2000	0.968	0.985	0.738	0.880
	2000—2010	0.409	0.881	0.652	0.651
	1985—2010	0.362	0.865	0.598	0.589
未利用土地 Unused land	1985—1996	0.591	0.598	0.519	0.506
	1996—2000	0.883	0.945	0.999	1.000
	2000—2010	0.977	0.990	0.892	0.800
	1985—2010	0.676	0.689	0.564	0.608

表4 流域景观稳定性年际变化特征

2.2 流域径流泥沙变化及水沙关系

2.2.1 径流泥沙特征

随着年份的增加,图 4 中流域年径流和泥沙均呈现减小的趋势,径流峰值点与泥沙峰值点一一对应。截至 2010年,秃尾河和孤山川流域径流减少率分别为 52.52% 和 80.95%,年均径流减少量分别为 375.30 和 135.24万 m³。2010年两流域泥沙量相对于 1956年分别减少了 97.26%和 99.77%,年均减沙量分别为 21.25

和46.23万t。说明几十年来水土保持作用明显,水土流失急剧减少。面积较大的秃尾河流域径流量(平均值3.28亿m³)明显高于孤山川流域(平均值0.63亿m³),但年平均产沙量几乎相同(0.14亿t)。由土地利用组成知,两流域虽然都以草地为主要景观类型,且孤山川流域草地面积比例更大(61.00%—62.61%),但该流域耕地面积占到总面积的30.37%—32.50%,比秃尾河流域多了近10个百分点。这是由于相对其他景观类型,耕地会加剧水土流失^[19],使产沙模数增大^[20]。根据实地调查,秃尾河流域淤地坝数量较多,拦淤泥沙作用明显。另外,与径流相比,泥沙的年际变异系数较大(均大于100%),属强变异,说明其更易受环境影响。





2.2.2 水沙关系

根据 SPSS 中 Pearson 相关分析知, 秃尾河与孤山 川流域年径流泥沙相关关系显著(P<0.01), 两流域径 流和泥沙的线性关系如图 5。其中景观多样性更大的 秃尾河流域径流水沙关系指数较低, 而孤山川流域水沙 相关系数达到了 0.85, 且径流产沙率更大(孤山川斜率 0.33>秃尾河斜率 0.13)。这可以解释孤山川年平均径 流量仅为秃尾河的 19.27%, 却有相似的年产沙量 (图 5)。

2.3 景观与水沙响应关系

流域内水土流失过程中向水体输出的径流和泥沙 受控于景观阻滞的空间格局,景观格局指数则综合了景 观的阻滞能力及地理位置,反映了其水土流失的潜在危





险^[21]。为了进一步研究景观格局对水沙的影响,我们对数据进行 Pearson 相关分析,结果发现景观格局与径 流和泥沙有显著相关(如表 5)。其中有更多的景观指数与年径流呈显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关, 当 PD、SHAPE_AM、CONTAG、COHESION 和 PRD 值越大时,年径流量越小,而与景观多样性相关的指数 SHDI、SIDI、SHEI 和 SIEI 均与径流呈极显著正相关。这意味着斑块密度和面积的增加对阻滞径流具有积极 作用;斑块结合度和蔓延度对侵蚀有显著的直接影响(决定系数分别为 0.773 和 0.738, P<0.05),这与同地区 其他流域相关研究结论一致^[22];与生物多样性不同,景观多样性强调的是景观中各斑块类型的非均衡分 布^[23],在本研究流域中,土地利用越丰富,破碎化程度越高,则越对径流产生的积极、显著的影响(P<0.01)。 另外,泥沙量仅与 CONTAG 和 COHESION 值呈显著(P<0.05)负相关,亦即当斑块与周围相邻斑块空间连接 程度较好,并且优势斑块类型内部连性较好时,径流中泥沙量明显减少。CONTAG 和 COHESION 指数对径流

8

有显著截留作用,但对泥沙输出却有积极影响,因此,从提供水源固持土壤的角度考虑,应采取水土保持措施 以减少 COTNAG 及 COHESION 的值。在流域土壤侵蚀防治过程中,重视利于固沙的景观蔓延度的同时,还要 关注各景观类型的连接度和连通性,避免产沙强度较大的景观集中分布形成侵蚀链增加防治侵蚀的难度^[24]。

	Table 5 Kelationship between landscape indices and runoff, sediment							
水土流失 water and soil loss	景观指数 LIs	回归方程 Regression equation	\mathbb{R}^2	Sig.				
径流 Runoff	PD	-4.457PD+5.010	0.916	0.003 **				
	SHAPE_AM	-0.1352SHAPE_AM+3.982	0.868	0.007 **				
	CONTAG	-0.113CONTAG+8.191	0.738	0.028 *				
	COHESION	-0.717COHESION+71.936	0.773	0.021 *				
	PRD	-334.76PRD+4.0689	0.840	0.01 *				
	SHDI	3.312SHDI-3.361	0.930	0.002 **				
	SIDI	9.788SIDI-5.135	0.914	0.003 **				
	SHEI	12.280SHEI-4.937	0.934	0.002 **				
	SIEI	9.808SIEI-5.588	0.916	0.003 **				
泥沙 Sedimentation	CONTAG	-0.006CONTAG+0.474	0.693	0.04 *				
	COHESION	-0.043COHESION+4.294	0.760	0.024 *				

表 5 景观指数与水沙关系

* 表示 pearson 相关性在 0.05 水平下显著; ** 表示 pearson 相关性在 0.01 水平下显著

3 结论

(1) 秃尾河和孤山川流域优势景观类型为草地,1985—2010 年间变化最大的景观类型分别为未利用土地(453.94 km²)和耕地(52.85 km²);

(2)随时间的增加,人为活动对流域影响越来越大,秃尾河流域景观均趋于规则、高连通和高度聚集的方向发展。孤山川控制流域内景观多样性和聚集度逐渐增加,整体向好。草地和未利用土地景观稳定性逐渐增加,而耕地和城乡工矿用地景观受人类活动干扰越来越强烈,其稳定性均逐渐减小。秃尾河流域景观稳定性指数高于孤山川流域。

(3)年径流量和泥沙量均呈现逐年同步减小的趋势。秃尾河年径流量高于孤山川,但由于孤山川流域耕 地面积较大,加之秃尾河流域淤地坝数量相对较多,孤山川流域泥沙量与秃尾河流域相近。两流域径流泥沙 相关关系显著,但秃尾河流域相关系数(0.48)明显低于孤山川流域(0.85)。

(4)景观指数与径流量、泥沙量呈显著线性相关,其中景观多样性相关的指数 SHDI、SIDI、SHEI 和 SIEI 均与径流呈极显著正相关,而泥沙仅与 CONTAG、COHESION 呈显著负相关。

参考文献(References):

- Wang S, Fu B J, He C S, Sun G, Gao G Y. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. Forest Ecology and Management, 2011, 262(7): 1189-1198.
- [2] 韩丽. 流域土地利用变化及水文效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [3] 赵阳. 密云水库集水区变化环境下的小流域径流演变规律研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [4] 李昌峰,高俊峰,曹慧.土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势.土壤,2002,(4):191-196,205.
- [5] Khalili Moghadam B, Jabarifar M, Bagheri M, Shahbazi E. Effects of land use change on soil splash erosion in the semi-arid region of Iran. Geoderma, 2015, 241-242; 210-220.
- [6] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 欧阳志云. 1990-2010年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [7] 陈世发. 基于 GIS 的亚热带山地土地利用与土壤侵蚀关系研究——以粤北山区为例. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 80-85.
- [8] Wang K, Wang H J, Shi X Z, Weindorf D C, Yu D S, Liang Y, Shi D M. Landscape analysis of dynamic soil erosion in Subtropical China: A case

study in Xingguo County, Jiangxi Province. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 313-321.

- [9] 曾永年, 靳文凭, 王慧敏, 张鸿辉. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185-194.
- [10] Paroissien J B, Darboux F, Couturier A, Devillers B, Mouillot F, Raclot D, Le Bissonnais Y. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). Journal of Environmental Management, 2015, 150: 57-68.
- [11] 王兮之,索安宁,洪军,毕晓丽,葛剑平. 泾河典型流域水沙变化及其景观格局分析. 水土保持研究, 2006, 13(4): 260-263.
- [12] 陆垂裕,孙青言,李慧,盖燕如.基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价.水力学报, 2014, 45(6): 701-711.
- [13] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Zhuang Dafang, Zhang Zengxiang, Deng Xiangzheng, Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000, Science in China (D), 46(4), 2003.
- [14] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195-210.
- [15] 周连义, 江南, 吕恒, 李俊杰, 曹凯. 长江南京段湿地景观格局变化特征. 资源科学, 2006, 28(5): 24-29.
- [16] 王景伟,王海泽.景观指数在景观格局描述中的应用——以鞍山大麦科湿地自然保护区为例.水土保持研究,2006,13(2):230-233.
- [17] 彭建, 王仰麟, 张源, 叶敏婷, 吴健生. 土地利用分类对景观格局指数的影响. 地理学报, 2006, 61(2): 157-168.
- [18] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京:高等教育出版社, 2000: 100-108.
- [19] 常春艳,赵庚星.土地利用/覆盖及其变化的土水资源效应研究.中国水土保持,2012,(12):58-61.
- [20] 陈洪松,杨静,傅伟,何菲,王克林.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征.农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- [21] 刘宇,吴炳方,曾源,张磊.耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价.应用生态学报,2013,24(9):2581-2589.
- [22] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较.生态学报,2011,31 (19):5531-5541.
- [23] 黄志霖,田耀武,肖文发,马德举.三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响.生态学报,2013,33(23):7487-7495.
- [24] 魏建兵,肖笃宁,李秀珍,布仁仓,张春山.东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系.生态学报,2006,26(8):2608-2615.