

延河流域景观格局与生态水文过程分析

李 晶, 周自翔

(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要: 延河流域作为典型的黄土高原丘陵沟壑区, 水土流失是最主要的生态环境问题, 其生态环境治理能为整个黄土高原生态恢复重建提供典型范例, 因此评价延河流域景观格局变化对水文过程的影响, 对流域景观格局与水文过程的研究具有重要的科学价值和现实意义。本文通过利用SWAT模型模拟的延河流域的41个子流域的水文响应单元, 建立延河流域的“源—汇”水文响应单元景观格局指数, 通过计算不同地形条件下水文响应单元随着坡度变化的面积累积百分比, 构建了新的“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 综合景观指数”。并与SWAT水文模型所模拟获得的子流域径流量、产沙量进行相关性分析, 评价“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 景观指数”对水文过程的表征能力和适用性。结果表明: 在子流域尺度上Slope-HRU景观指数和产沙状况存在明显的区域分异规律, 而且R值空间变异情况基本上与产沙量的空间变化规律相反, 即R值呈现由南向北, 由东向西递增, 而产沙量由南向北, 由东向西递减。R值与年产沙量在数值上呈显著相关关系, 相关系数为-0.60; 再将Slope-HRU景观指数与所选取的7个常用景观格局指数相结合, 构成新的综合景观指数, 发现它们与子流域的产沙量耦合关系明确, 均显著负相关, 相关系数绝对值范围为0.43~0.63。

关键词: 延河流域; 景观格局; 水文过程; 水文响应单元; 景观指数

DOI: 10.11821/dlxb201407006

1 引言

延河流域作为典型的黄土高原丘陵沟壑区, 水土流失是最主要的生态环境问题, 其生态环境治理能为整个黄土高原生态恢复重建提供典型范例; 探讨延河流域退耕还林 (草) 政策实施前后土地利用/覆被变化的特征, 围绕该流域水土流失这一核心生态问题, 探寻土地利用/覆被变化引起的景观格局变化对生态过程, 尤其是泥沙输送过程的影响规律, 将自然环境条件与人类社会发展以及历史发展过程相互联系, 评价流域景观格局变化对重要生态过程的影响, 对流域综合治理有重要的现实意义。

建立格局与过程之间相互联系的首要问题是: 需要针对所关注的具体生态过程发展相应的景观指数。具体针对土壤侵蚀过程设计的景观指数, 要与土壤侵蚀的关系密切, 指数值与土壤侵蚀变量的关系明确^[1]。傅伯杰等^[1-4]在考虑土地利用、地形、土壤、降雨等影响因素的基础上, 应用尺度转换的方法, 构建了不同尺度土壤侵蚀评价指数。Borselli等基于径流、泥沙的迁移过程, 提出分布式水沙流连接性指数 (IC) 和基于野外侵蚀实地调查数据用于验证连接性的指数 (FIC)^[5]。Ludwig 等提出了基于景观留滞水土功能、覆被和地形属性及物质运动方向的方向性渗透指数 (DLI)^[5]。Mayor 等在划分“源”和“汇”的基础上, 用Flowlength作为水土流失研究中景观格局的表征, 并在小区到集水区尺度的观测

收稿日期: 2013-04-15; 修订日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371020); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2012JM5011) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371020; Natural Science Foundation of Shaanxi Province, No.2012JM5011]

作者简介: 李晶 (1977-), 女, 吉林省吉林市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员 (S110007315M), 主要从事国土资源评价与GIS。E-mail: lijing@snnu.edu.cn

实验中验证了该指数与产流产沙的相关关系^[6-8]。陈利顶等提出了基于过程的景观空间负荷对比指数^[9]反映景观空间格局对生态过程的影响,而且不受尺度限制。以上模型充分考虑了格局与过程的关系,基于土壤侵蚀过程机制的景观指数与产沙、产流等过程变量具有很好的相关性,能更好地描述和解释格局—过程关系,是景观格局—土壤侵蚀关系研究中景观指数的发展方向^[9]。从而为研究景观格局与生态过程提供了新的思路。

“源—汇”景观格局理论是近年来出现的一种用于景观格局分析的研究手段^[11-12],可以用于表达水土流失的空间异质性。根据该理论,在水土流失形成过程中,流域中一些景观类型起到了“源”的作用,一些景观起到了“汇”的作用,同时一些景观起到了传输的作用^[11-12]。在景观生态学中,如何区分“源”景观和“汇”景观,应该针对具体的过程进行分析。“源”景观是促进水土流失过程发生的类型,“汇”景观是抑制水土流失过程发生的类型。若以土地利用单元作为景观单元来划分,源景观有耕地、园地、建设用地;汇景观有林地、灌丛、草地、水域和未利用土地^[12]。土壤流失与土壤沉积是相辅相成、同时发生的过程,实际上每一个地块上土壤流失与土壤沉积的过程是在同时发生的,促进水土流失与抑制水土流失并存,区别是两个过程哪一个表现得更明显。另外,由于延河流域具有地表破碎,沟间地以丘陵为主,梁状和峁状丘陵占流域沟间地的80%左右、人类干扰强烈等特点,使得对参数要求很高的机制模型应用困难^[13]。因此,若以土地利用单元作为景观单元来区分“源”景观和“汇”景观,就存在一个不足,没有考虑地形的约束影响,尤其是坡度的影响。此外还有土壤类型的影响。因此,本研究通过利用SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型划分的延河流域的41个子流域的水文响应单元,建立延河流域的“源—汇”水文响应单元景观格局指数,通过计算不同地形条件下水文响应单元随着坡度变化的面积累积百分比,构建了“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 景观指数”。并与SWAT水文模型所模拟获得的子流域径流量、产沙量进行相关性分析,评价“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 景观指数”对水文过程的表征能力和适用性。

2 研究区概况和数据处理

2.1 研究区概况

延河发源于陕西靖边县姬家畔附近的白于山东坡,自西北向东南流经志丹、安塞、延安、延长等县(市),于延长县凉水岸汇入黄河,属于黄河一级支流,全长286.9 km,流域面积7725 km²。延河流域,其北部是清涧河流域、西南部为北洛河流域、南部和云岩河流域相接,海拔最高为1731 m,宝塔区平均海拔为958 m,属黄土丘陵沟壑区。年降水量偏少,年降水量在400~550 mm,多年平均降水量为520 mm,本地区年均气温为8.8~10.2℃,由西北向东南递增,平均日温差13.2℃。光能资源丰富,年总辐射量为125~134千卡/cm²,有效辐射量为67.8千卡/cm²。无霜期为157~187天。延河流域残存的天然林不多,森林草原为地带性植被,但是,少量的灌丛林也呈块状分布,从而形成以牧草为主的景观现状,干旱草本植物是植被的优势种。延河水系为延安地区第二大水系,主要支流包括了杏子河、平桥川、西川河、南川河、蟠龙川等^[14-15]。延河可以分成上、中、下游三段,可以将流域相应划分为上、中、下游三段区域:上、中游的分界是安塞县的化子坪;中、下游的分界是宝塔区的甘谷驿。根据中国土地利用现状分类系统,结合研究区土地利用现状及其特点,将土地利用类型共分为8个一级土地类型(图1),即:耕地(旱地和水田)、灌丛林地、有林地、牧草地(天然草地和人工草地)、建筑用地(居民点、工矿及城镇用地)、园地(果园、菜园)、水域(河流、水库和池塘等)、和未利用地(沼泽和滩涂地)。

2.2 数据来源

本文主要参考延安市地理志^[14]等地理和历史文本文献^[15],数字高程数据DEM、统计数

据, 2010 年土壤类型图、地形图、地貌图以及交通图、行政图等相关图件, 野外实地考察获得的植被、水文、土壤分布、土地利用和退耕还林实施情况等资料; 1956-2011 年逐月实测气象数据和 1990-2010 年水文站点的实测水文数据; 本研究选用的影像资料包括 Landsat TM、Landsat ETM+ 和 SPOT4 卫星遥感数据。其中, 2010 年为 SPOT4 数据, 共 9 景, 空间分辨率为 20 m。运用 ERDAS 9.2 软件, 对 2010 年 SPOT 影像进行解译, 得到 1:5 万的延河流域土地利用类型空间分布图和土地利用类型的属性数据库。

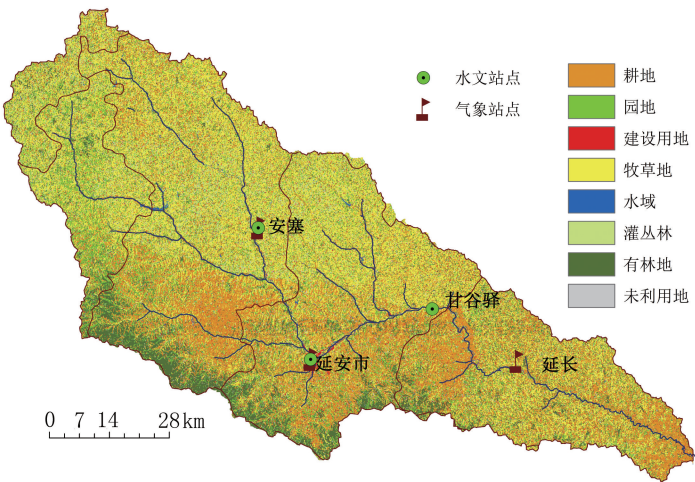


图1 延河流域2010年土地利用图
Fig. 1 Land use map of the Yanhe River basin in 2010

3 研究方法

3.1 SWAT 分布式水文模型

SWAT模型是由美国农业部的农业研究中心研发的, 是免费、开源的, 是一种基于GIS基础之上的分布式流域水文模型, 在调参、径流模拟、地表水、非点源污染计算、面源污染、数据构建、生态修复、作物生长、参数率定、敏感性分析、农业管理措施等方面都有着广泛的应用。

SWAT模型主要的运行步骤如下: (1) 划分子流域。当流域内不同区域的土地利用或土壤属性等差异明显足以影响水文过程时, 在模拟中就需划分子流域。各子流域的输入有: 气候、HRUs、坑塘/湿地, 地下水及子流域排水的主河道或河段^[16]。(2) 确定水文响应单元。水文响应单元 (hydrologic response units, HRUs) 是具有相同的植被类型、土壤条件的陆面表面综合体^[16]。水文响应单元在子流域内呈块状分布, 包含有唯一的土地覆盖、土壤和管理措施^[16]。水文响应单元 (HRUs) 体现植被覆盖类型、土壤属性和地形等信息, 这就要求输入流域的土地利用类型、土壤类型属性及地形数据。SWAT模型单独计算每个HRU的径流量, 进行汇流验算, 最后求得出口断面的流量, 从而提高模拟的精度, 可以更好地反映本流域的水量平衡。(3) 输入气象要素。划分出HRUs后, 模型的SWAT View可以为每一个HRU输入用于水文计算的气象数据, 每一个HRU的气象数据是由最近站点的气象资料赋予的^[16]。(4) 构建数据库及数据库的调整。完成以上输入工作后, 水文计算就全由模型自动完成了。(5) 模型运行。最后一步是选择合适的计算方法及输出项后执行模型运行的命令, 输出结果^[16]。

3.2 景观指数选取

景观指数可分为斑块水平 (Patch-Metric)、景观类型水平 (Class-Metric) 和景观水平 (Landscape-Metric) 等类型, 本文应用景观格局分析软件FRAGSTATS4.1来计算景观指数。因此, 对所获得景观指数进一步做主成分分析。确定选取的景观指数共有7个, 即“独立核心斑块密度指数DCAD、回旋半径指数GYRATE_SD、整体性 (斑块凝聚度) 指数COHESION; 香农均匀度指数SHEI、核心斑块总面积TCA、周长面积分维指数PAFRAC、散布与并列指数IJI”。具体景观指数表达式参见参考文献^[17-18]。

3.3 “源—汇”景观指数构建

本研究依据水文响应单元的三个特性：土地利用类型、土壤类型、坡度，给每一个水文响应单元的“源”、“汇”景观特型赋值。

3.3.1 土地利用类型权重的确定 植被覆盖与管理因子(C值)区别土地利用类型。某一单元上某一种土地利用类型可能即是水土流失的源，也是水土流失的汇，但源和汇的贡献率不同，例如，林地可能汇的贡献大，耕地源的特征很明显。本研究中土地利用类型借鉴了土壤侵蚀通用方程中的植被覆盖与管理因子(C值)^[21-22]对其“源”和“汇”的贡献权重进行了简单赋值。确定权重的方法很多，本研究采用专家咨询法，并结合经验权数法和层次分析法进行修正，对各个类型赋值。源的指数依次为：建设用地(1.0)、耕地(0.8)、园地(0.6)、有林地(0.2)、灌丛地(0.3)、草地(0.4)、未利用地(0.5)、水域(0)；汇的指数：建设用地(0)、耕地(0.2)、园地(0.4)、林地(0.8)、灌丛地(0.7)、草地(0.6)、未利用地(0.5)、水域(1)。各指数采用无量化。

3.3.2 土壤影响定量化 在本文中，结合流域侵蚀强烈的水文过程特点，将土壤可蚀性K值作为土壤类型的表征指标。K值越大，抗水蚀能力越小；反之，K值越小，抗水蚀能力越强^[23]。为了反映土壤可蚀性K值在地块源属性和汇属性中的不同意义，用下面公式(1)求得 $K_{源}$ 和 $K_{汇}$ ，反映同一地块作为源和汇时其土壤的不同作用效果。

$$K_{源} = 1 + \frac{K - \bar{K}}{\bar{K}} \quad K_{汇} = 1 - \frac{K - \bar{K}}{\bar{K}} \tag{1}$$

式中： $K_{源}$ 和 $K_{汇}$ 分别是源和汇时其土壤侵蚀能力； K 为土壤可蚀性因子。

3.3.3 地形因子定量化 地形因子是影响土壤侵蚀的主要因素之一，同时也是进行水土流失评价和土壤侵蚀预测计算的重要因子。黄土地貌则是通过其形态、结构和类型影响着侵蚀过程、方式及强度。

3.3.4 水文响应单元水土流失权重 综合上述分析，将植被覆盖与管理因子C值、土壤可蚀性K值和坡度三者综合，得到了水文响应单元水土流失权重(P)，公式如下：

$$P_{源} = C_{源} \times K_{源} \times \sin a \tag{2}$$

$$P_{汇} = C_{汇} \times K_{汇} \times \cos a \tag{3}$$

式中： $C_{源}$ 和 $C_{汇}$ 分别为源和汇的植被覆盖与管理因子，取值0~1之间^[21-22]， K 为土壤可蚀性值。 a 为水文响应单元所在坡度， $\sin a$ 取值介于0~1之间， $\cos a$ 介于1~0之间。

3.4 地形—水文响应单元(Slope-HRU)景观指数

本文尝试建立了小流域的“地形—水文响应单元(Slope-HRU)景观指数”，并确定了相关的基本概念和计算模型。对于研究区域中每一个子流域来说，本文建立的“地形—水文响应单元(Slope-HRU)景观指数”就是每一个由土地利用、土壤类型和坡度要素共同确定的水文响应单元，经水土流失“源”、“汇”景观权重赋值后，作为“源”和“汇”的水文响应单元的累计面积比值。即Slope-HRU景观指数表示以水文响应单元为景观单元，相对于某一坡度(slope)而建立的“源—汇”景观指数，分别用源景观单元的面积和源景观的权重相乘得到的积的总和与汇景观单元的面积和汇景观的权重相乘得到的总和相比，所得到的比值。可以用公式表示为：

$$R = N/M \quad M = \sum S_i P_{源i} \quad N = \sum S_i P_{汇i} \tag{4}$$

式中： R 为Slope-HRU景观指数的值， N 是汇景观加权面积总和； M 是源景观加权面积总和； S_i 为第*i*个水文响应景观单元的面积， $P_{源i}$ 为第*i*个水文响应景观单元水土流失源的权重； $P_{汇i}$ 为第*i*个水文响应景观单元水土流失汇的权重；

Slope-HRU指数计算步骤为：首先将子流域的“源—汇”景观类型进行栅格化处理，然后确定水文响应单元的面积和所属土壤类型及其土壤侵蚀k值、植被覆盖与管理因子C值，所在地平均坡度，并计算其分别作为源景观和汇景观的权重，并依据公式4求得加权

景观单元面积之和。最后用所得到的汇景观加权面积总和N与源景观加权面积总和M相除,所得的值R即为Slope-HRU指数值。

4 结果分析

4.1 HRU划分和定义

本研究根据延河流域地形、土壤、土地利用和水土流失的实际情况,水文响应单元定义的具体过程中,分别将延河流域分辨率为30 m的土地利用/覆盖数据和土壤数据导入模型,参数选取结果如下:(1)主要参数设定:土地利用图层、土壤类型图层和坡度图层的面积比例阈值设定为,土地利用类型数据最小面积比例为5%,土壤类型数据最小面积比例为30%,坡度最小面积比例为5%。(2)坡度划分:采用Multiple Slope方法,将坡度分为3级(坡度按百分比),设置坡度系数:“slope class 1”为0~10%、“slope class 2”为10%~30%、“slope class 3”是大于30%。将坡度如此划分的依据是:延河流域地表破碎,沟壑纵横,广泛分布梁、峁斜坡和沟谷陡崖,前者坡度多在10~35度之间,后者坡度多大于35度。这些陡坡为流水侵蚀和重力侵蚀提供了有利的地貌条件。

水文响应单元(HRUs)的命名规则为“子流域编码+土地利用/覆被类型编码+土壤类型编码+坡度(所在区间)”,例如:“18_FRST_FLC_10~30”是指“第18个子流域、土地利用/覆被类型为林地、土壤类型为FLC、坡度在10%~30%之间”的同一类水文响应单元(HRUs)。在每个子流域内,具有相同命名的水文响应单元(HRUs)可以看作是景观格局性质相同的同一种类型的“斑块”。子流域中具有相同命名(即土地利用类型、土壤类型和坡度属性相同)的斑块是SWAT模型所划分出的最小单元,而且该类景观单元(斑块)在子流域内具有相同的水文过程。HRUs的优势在于其能提高子流域内负荷预测的精度。研究时为了能在一个数据集内涵盖更丰富的信息,一般要求生成多个子流域,每个子流域具有的HRUs数量要合适。HRUs创建过程中会产生一个报表,报表会列出每一个子流域中HRUs的土地利用、土壤和坡度等属性。

4.2 延河流域土地利用/覆被变化的水文效应模拟

本文利用SWAT模型模拟得到延河流域逐年各月径流和产沙量。为验证结果的准确性,将实测的资料分为两部分,一部分用于校准模型,而另一部分用于模型的验证。本研究方案将选择1990-2010年甘谷驿水文站的径流数据对SWAT模型进行参数率定和验证。其中选择1990-1999年为参数率定期,而以2000-2009年的径流数据进行结果验证。模型根据径流参数的相对敏感性,不断调整参数的取值范围,期望得到一组合适的参数,以求

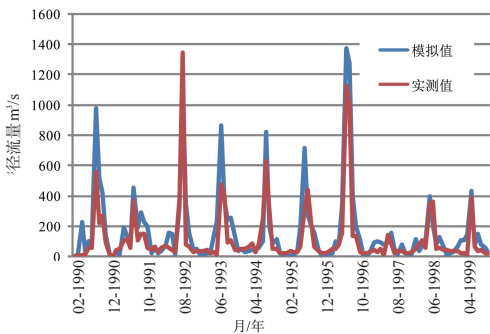


图2 1990-1999验证期逐月径流流量模拟值与实测值对比图

Fig. 2 Simulated and realistic monthly runoff data in validation period from 2000 to 2009

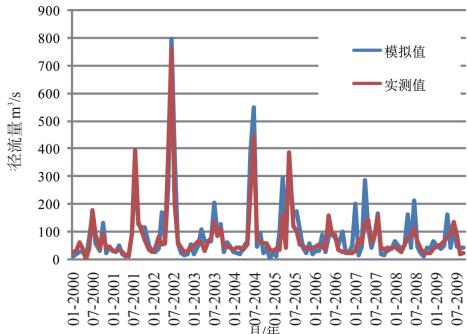


图3 2000-2009验证期逐月径流流量模拟值与实测值对比图

Fig. 3 Simulated and realistic monthly runoff data in validation period from 2000 to 2009

达到较好的模拟效果。1990-1999年逐月的实测日均径流量跟模拟值周期分布接近，相关性较好(图2和图3)，相关性系数 R^2 为0.834；说明模拟值与实测值接近，且相关程度高，可信赖。从图中可以看出，2000-2009年的径流量模拟结果好，与实测值的相关性和误差都在接受范围之内。相关性系数 R^2 为0.819，表明实测值和模拟值的相关性较高；模拟精度高，模拟结果可信赖。

4.3 子流域景观指数与径流、产沙耦合分析

本文对延河各子流域的景观指数与径流、产沙量做耦合分析。用SPSS17.0对2010年延河流域41个子流域的景观指数(子流域水文响应单元分辨率80 m)与年累计径流深、年产沙量进行相关分析(表1)。全部7个所选景观指数与径流量的相关系数很小，不能通过检验。说明前文选出的7个景观指数与延河流域的径流之间没有显著相关性。

但是，延河流域除了TCA和IJI外其他五个景观指数与产沙量之间有一定相关性，或者说在一定水平上有显著相关性，五个水文响应单元景观指数与子流域产沙量数据之间有较为明显的耦合关系。具体来看，延河流域水文响应单元景观指数与子流域产沙量之间的关系是：独立核心斑块密度(DCAD)与其呈显著负相关，连通度指数(COHESION)呈显著正相关，周长—面积积分形维数(PAFRAC)与子流域产沙量呈负相关，香农均匀度指数(SHEI)呈正相关，回旋半径(GYRATE_SD)也呈正相关。但是，以上各景观指数的绝对值都比较小，在0.3~0.5左右。计算结果也说明水文响应单元总核心面积(TCA)和散布与并列指数(IJI)与各子流域的径流量和产沙量之间没有耦合关系。可以确信水文响应单元的连通性越好、多样性越高且分布越均匀土壤侵蚀越容易发生，产沙量越大；而且水文响应单元的密度和形状对产沙过程有影响。水文响应单元的周边越简单产沙量越大，边界越曲折对侵蚀的约束越大。

4.4 Slope-HRU 景观指数

4.4.1 Slope-HRU景观指数与水土流失量的关系 以2010年所获得的延河流域各子流域的水文响应单元数据为基础数据，利用MATLAB编程语言，实现了延河41个子流域的Slope-HRU景观指数的计算。用SPSS17.0对延河41个子流域的Slope-HRU景观指数与子流域的产流量和产沙量做相关分析(见表2)。可以看出M与N彼此显著相关，而且M与R显著相关，但是N与R之间并不相关。M、N、R与产流量之间没有明显相关关系，而M、R与产沙量之间有明显相关关系，尤其是R与产沙量之间有显著的相关性，相关系数达到0.6。我们也做了以下计算比较：如果去除土壤可蚀性K值，只考虑地形和土地利用影响权重，则生成的R与产沙量之间也有显著的相关性，但相关系数下降为0.561。显然构建景观指数时考虑土壤可蚀性很有必要。在延河流域的Slope-HRU景观格局指数与径流量和产沙量的相关系数分别为0.069、-0.6。可以看出，Slope-HRU景观指数与径流量的相关系数接近于0，也就是说R值不能体现产流过程，但是各子流域R值和产沙量的相关性达到显著相关，而且其相关系数要高于上文中计算所得到的7个景观格局指数与产沙量的相关系数。说明Slope-HRU景观指数能够有效的表征流域水土流失的特征，在空间分布上也有一定的对应关系。本研究中不同子流域的Slope-HRU景观指数与产沙量的相关性有所

表 1 2010 年延河各子流域的景观指数与年累计径流深、年产沙量的相关系数
Tab. 1 The correlation coefficient among annual runoff, annual sediment yield and landscape index in the sub-basins of the Yanhe River basin in 2010

景观指数	独立核心 斑块密度 (DCAD)	回旋半径 (GYRATE_SD)	连通度指数 (COHESION)	香农均匀度 指数 (SHEI)	总核心面积 (TCA)	周长—面积 分形维数 (PAFRAC)	散布与并列 指数 (IJI)
径流深	-0.127	0.057	0.156	-0.139	-0.102	-0.016	-0.288
产沙量	-0.502**	0.335*	0.428**	0.340*	-0.186	-0.397*	0.233

** 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。* 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

表2 延河41个子流域Slope-HRU景观指数(R值)与年径流量和产沙量相关分析结果
Tab. 2 The correlation coefficient among landscape Slope-HRU indices (R-value) and annual runoff and annual sediment yield in the 41 sub-basins of the Yanhe River basin in 2010

		源景观 (M)	汇景观 (N)	Slope-HRU景观指数 (R)	径流量	产沙量
源景观 (M)	Pearson 相关性	1	0.809**	0.429**	-0.075	0.320*
	显著性 (双侧)		0.000	0.005	0.640	0.041
	N	41	41	41	41	41
汇景观 (N)	Pearson 相关性	0.809**	1	-0.072	-0.129	-0.022
	显著性 (双侧)	0.000		0.656	0.420	0.890
	N	41	41	41	41	41
Slope-HRU景观指数 (R)	Pearson 相关性	0.429**	-0.072	1	0.069	-0.600**
	显著性 (双侧)	0.005	0.656		0.669	0.000
	N	41	41	41	41	41
径流量	Pearson 相关性	-0.075	-0.129	0.069	1	-0.077
	显著性 (双侧)	0.640	0.420	0.669		0.633
	N	41	41	41	41	41
产沙量	Pearson 相关性	0.320*	-0.022	-0.600**	-0.077	1
	显著性 (双侧)	0.041	0.890	0.000	0.633	
	N	41	41	41	41	41

** 在 0.01 水平 (双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平 (双侧)上显著相关。

差异，这与不同区域的地理特征和土地利用格局的差异有关系。

以2010年延河41个子流域的Slope-HRU景观指数和水文数据为代表，对延河流域的Slope-HRU景观指数和水土流失状况进行了分析，结果表明Slope-HRU景观指数和产沙状况存在明显的区域分异规律(图4，图5)。而且Slope-HRU景观指数R值也表现空间分异规律，呈现由南向北，由东向西递变的趋势。所不同的是在子流域尺度上产沙量由南向北，由东向西递减而R值由南向北，由东向西递增。说明产沙量的空间变化除了受径流量作用之外还受到下垫面的地形、土壤、植被等因素影响明显，这种影响Slope-HRU景观指数R值有所体现。但是R值最大、最小的子流域与产沙量最大、最小的子流域并不重合，也说明R值也不能完全表征流域景观格局与水土流失过程的关系，换句话说，Slope-HRU景观指数R值能够部分反映景观格局与水土流失过程的空间相互关系和分异规律。在第17、34子流域R值最小，在第1、2、3、5、6、7、8、9、11、12、13、14、20子流域R值最大(图6)。

基于野外监测数据显示，延河流域水土流失量存在明显的空间异质性，呈现出自东南向西北递减的趋势，这一趋势与本流域的年降雨量分布、地形条件、土壤可蚀性因素以及

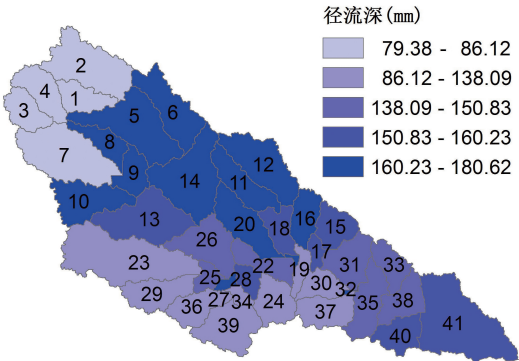


图4 延河流域2010年径流深空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of runoff depth of the Yanhe River basin in 2010

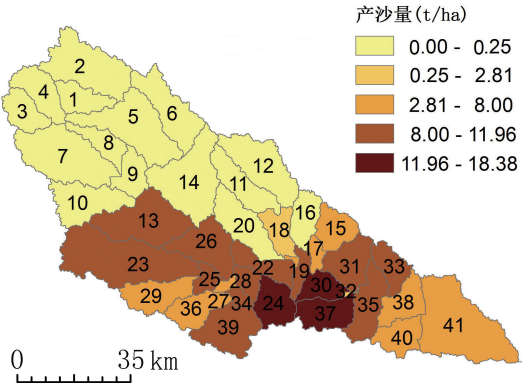


图5 延河流域2010年产沙量空间分布图
Fig. 5 Spatial distribution of sediment yield of the Yanhe River basin in 2010

土地利用与植被覆盖之间有明显的空间变化趋势相似性，这一趋势在 Slope-HRU 景观指数 R 值的空间分布中得到了集中体现。R 值与水土流失泥沙数据呈负相关关系，在子流域尺度上 R 值自东南向西北增强。水土流失严重的东南部区域 R 值也较小；相对来说，流域的西北部 R 值较大，水土流失也较弱。这种空间分异特征与土地利用方式、地形和土壤类型的空间差异有必然联系。由于除了受植被、土壤类型、地形等较稳定的自然要素影响之外，水土流失还受到降水、耕作方式、土壤管理模式（如施肥等）等多变因素影响，所以，R 值表现出的区域分异规律也比较复杂。总体来看，土地覆盖、地形、土壤类型等景观要素是最重要的参数，其空间分布格局直接影响着流域土壤侵蚀发生过程，R 值是地形、土地覆盖、土壤类型等景观要素的综合量化指标，集中表现了景观格局与水土流失过程的空间相互关系。

4.4.2 Slope-HRU 的景观特征 为了进一步探索流域水文响应单元的景观格局指数，能够更好的表现水文响应单元景观格局与产沙过程的关系，尝试新构建的 Slope-HRU 景观格局指数与常用景观格局指数相结合。本文分别将选取的 DCAD、GYRATE_SD、COHESION、SHEI、TCA、PAFRAC、IJI 等 7 个常用景观格局指数与 Slope-HRU 景观格局指数的 R 值相乘，得到独立核心斑块密度 Slope-HRU 景观格局指数 (DCAD-R)、回旋半径 Slope-HRU 景观格局指数 (GYRATE-R)、连通度 Slope-HRU 景观格局指数 (COHESION-R)；香农均匀度 Slope-HRU 景观格局指数 (SHEI-R)、核心斑块总面积 Slope-HRU 景观格局指数 (TCA-R)、周长面积分维 Slope-HRU 景观格局指数 (PAFRAC-R)、散布与并列 Slope-HRU 景观格局指数 (IJI-R) 等 7 个新综合景观指数。发现它们都与子流域的产沙量显著相关，而且，PAFRAC-R 和 DCAD-R 的值比 Slope-HRU 景观指数的 R 值具有更好的相关性（见表 3）。子流域的面积与周长分维数 PAFRAC 与 Slope-HRU 景观指数相结合，二者叠加的结果放大了彼此表征生态过程的能力。水文响应单元的独立斑块密度指数 DCAD 与流域产沙量具有紧密的相关性，相关系数已经达到-0.502，比其他几个常用的景观格局指数相关性高，再将它与 Slope-HRU 景观指数相结合，二者相乘得到的 DCAD-R 指数，是本文研究中最具表征流域产沙过程的指数。通过分析 PAFRAC-R 和 DCAD-R 指数，我们得到这样的结论，也就是地形（坡度）、土地利用、土壤类型（可蚀性）决定的水文响应

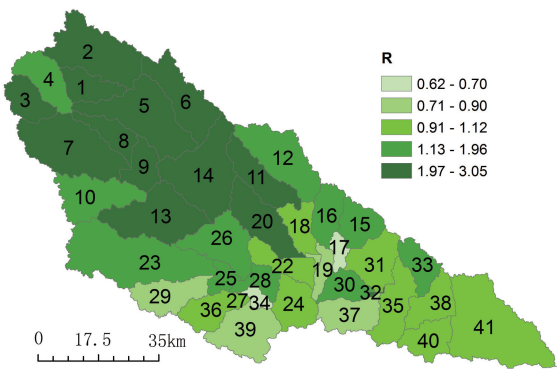


图 6 延河流域 41 个子流域的 Slope-HRU 景观指数空间分布特征
Fig. 6 Spatial pattern of Slope-HRU index in the 41 sub-basins of the Yanhe River basin

表 3 子流域景观格局指数与径流量和产沙量之间的相关性比较

Tab. 3 Comparison of the correlation among annual runoff and annual sediment yield and landscape indexes in the sub-basins of Yanhe River basin								
相关系数	周长面积分维 Slope-HRU 景观格局指数 (PAFRAC-R)	独立核心斑块密度 Slope-HRU 景观格局指数 (DCAD-R)	连通度 Slope-HRU 景观格局指数 (COHESION-R)	核心斑块总面积 Slope-HRU 景观格局指数 (TCA-R)	散布与并列 Slope-HRU 景观格局指数 (IJI-R)	回旋半径 Slope-HRU 景观格局指数 (GYRATE-R)	香农均匀度 Slope-HRU 景观格局指数 (SHEI-R)	独立核心斑块密度-周长面积分维-Slope-HRU 景观格局指数 (DCAD-PAFRAC-R)
径流量	0.067	0.025	0.083	-0.041	0.027	0.096	0.049	0.024
产沙量	-0.601**	-0.626**	-0.580**	-0.431**	-0.587**	-0.550**	-0.572**	-0.626**

** 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

单元的面积周长分维数和独立斑块密度能够很好的反映流域产沙情况,均呈现负相关关系。因此,将经过主成分分析筛选出的常用景观格局指数,与基于水土流失的源汇理论并考虑主要景观因子而构建的源汇 Slope-HRU 景观指数,二者相结合得到的综合景观指数,具有更强的表征生态过程的能力,其分析结果既优于常用景观格局指数也优于源汇 Slope-HRU 景观指数。我们再将 DCAD、PAFRAC 和 R 值三者相乘得到的积命名为独立核心斑块密度一周长面积分维—Slope-HRU 景观格局指数 (DCAD-PAFRAC-R),经计算各子流域该指数与产沙量之间也有显著相关性,但是相关系数与 DCAD-R 指数和产沙量的相关系数相同,均为-0.626。

5 讨论

(1) 通过本研究表明,子流域中 Slope-HRU 景观格局指数的 R 值越大,流域的土壤流失量越小;相反, R 值越小,流域的土壤流失量越大,二者成反相关关系。源汇景观格局指数将景观类型、面积、地形、土壤类型等信息进行集成,考虑了水文过程的部分机制,具有跨尺度性,可以适合于不同面积、气候、地形特征的流域。源汇景观格局指数是一个相对值,适合于环境背景相似的流域,如果环境背景差异较大的不同流域之间进行比较,可能指数不具可比性^[22-23],需要考虑进来其它环境因子。源汇景观指数的构建具有开放性,可以将其它空间属性和指标加以引进^[24-25],也会增加该指数的模拟精度,比如流域形状、雨水汇集路径、空间位置等。在下一步研究中,还需要通过比较其它传统的景观格局指数,综合评价源汇景观指数的准确性。

(2) 本文着力构建“流域—子流域—景观单元”三级系统,将水文响应单元作为基本景观单元,其空间分布格局与水土流失过程互为因果。格局是过程发生的基础,过程促使格局形成与演变。定义水文响应单元遵循地理要素综合分析原则,将影响水文过程的重点地理要素与水文响应单元的划分紧密结合起来。也就是说,水土流失是由地形、植被、土壤、气候、人类活动等综合影响的,划分景观单元要综合考虑这些因素。达到景观单元与水文过程单元意义相同目的。定义“源/汇”景观水文响应单元时所采用的因素中,要着重考虑稳定的地理要素,如土壤属性、坡度等短期内不会发生变化者,同时土地利用方式是一个综合指标,它能有效的反映出人类活动的影响。延河流域被划分为 41 个子流域,各子流域由众多水文响应单元组成,在水文响应单元栅格数据基础上,依据水土流失“源/汇”理论,本文构建了延河流域的一个“源—汇”景观格局指数,即“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 景观指数”。并与子流域的径流量、产沙量进行相关性分析,评价“地形—水文响应单元 (Slope-HRU) 景观指数”对水文过程的表征能力和适用性。虽然该指数与产沙量之间有显著相关性,但它与径流量之间没有相关性,因此进一步深入分析该指数与水文过程的互动机制依旧难度很大,如何将流域空间上的景观格局与监测点的数据联系起来是景观生态学家长期比较困惑的问题,加上研究尺度的变化,正确合理地评价景观格局与生态过程之间的关系仍然存在较多问题需要继续探索,例如,景观格局对土壤侵蚀过程的作用机理、人文社会驱动力对“景观格局—水文过程”系统的作用效果和改善途径等尚需继续深入研究。

(3) “源—汇”景观格局理论为定量刻画水文过程的特征指明了方向。本研究仅仅利用了地形坡度指标和土壤可蚀性以及土地利用类型三个因素,构建了“源-汇”景观格局 Slope-HRU 指数,结果 Slope-HRU 指数与产沙量的相关性要远高于常用的景观格局指数,或者简单的“源—汇”景观面积比值指标。“源—汇”景观 Slope-HRU 指数针对水土流失的发生过程构建,该指数值的大小与水土流失的发生程度形成对应关系,不仅在数值上,在空间分布上也有对应关系。表明该指数可以在流域土壤侵蚀过程评价中进行应用,而且

具有简单易用等特点,同时该指数可以与常用的景观格局指数结合使用。

由于本文考虑了土壤可蚀性使得构建的 Slope-HRU 景观格局指数更加合理,比较发现,不考虑土壤可蚀性 K 值,2010 年各子流域的 Slope-HRU 景观格局指数的 R 值与产沙量的相关系数为 -0.523,考虑土壤 K 源和 K 汇值后, R 值与产沙量的相关系数为 -0.6。由于当前欠缺对水土流失过程受植被覆盖与管理因子 C 值、土壤可蚀性 K 值和坡度三者影响原理的深入认识,在构建的 Slope-HRU 景观格局指数中的水土流失权重 P 时,只是以三者的乘积这一简单的函数关系来表示 P 的大小。能否构建更加合理的函数关系表达式,尚需要对水土流失过程受植被覆盖与管理因子 C 值、土壤可蚀性 K 值和坡度三者影响的原理不断深入研究。

6 结论

(1) 基于 SWAT 模型对延河流域土地利用/覆被变化的水文效应进行模拟分析,得出随着林、灌、草地面积的增长有助于延河径流量增加,而泥沙量将会大幅度减小的结论。

(2) 本文首次尝试将水文响应单元 (HRUs) 作为基本景观单元来研究景观格局。尝试用土地利用类型、土壤类型、地形坡度等几个要素区分、定义和命名水文响应景观单元 (HRUs)。在景观水平上,通过主成分因子分析选取 DCAD、GYRATE_SD、COHESION、SHEI、TCA、PAFRAC、IJI 等 7 个景观指数来研究水文响应单元 (HRUs) 的空间格局特征。景观指数与径流量的相关系数很小,全部不能通过显著性检验。但除了 TCA 和 IJI 外其他五个景观指数与产沙量之间有显著相关性,相关系数绝对值基本介于 0.3~0.5 之间。

(3) 本文尝试构建 Slope-HRU 景观指数,反映景观格局与水土流失过程的相互关系。根据水土流失“源—汇”景观格局理论,充分考虑坡度大小、土地利用类型、土壤可蚀性对水土流失过程的影响,计算每个子流域 Slope-HRU 景观指数的值 R ,分析延河流域 41 个子流域的 R 值空间分布特征,结果表明在子流域尺度上 Slope-HRU 景观指数和产沙状况存在明显的区域分异规律,而且 R 值空间变异情况基本上与产沙量的空间变化规律相反,即 R 值呈现由南向北,由东向西递增,而产沙量由南向北,由东向西递减。 R 值与年产沙量在数值上呈显著相关关系,相关系数为 -0.60;再将 Slope-HRU 景观指数与上文所选取的 7 个常用景观格局指数相结合,构成新的综合景观指数,发现它们与子流域的产沙量耦合关系明确,均显著负相关,相关系数绝对值范围为 0.43~0.63。

参考文献 (References)

- [1] Lu Yihe, Chen Liding, Fu Bojie. Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 1-10. [吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 1-10.]
- [2] Chen Liding, Fu Bojie, Zhao Wenwu. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449. [陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [3] Zhao Wenwu, Fu Bojie, Chen Liding. The effects of grain change on landscape indices. *Quaternary Science*, 2003, 23(3): 327-333. [赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 景观指数的粒度变化效应. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 327-333.]
- [4] Sun Ranhao, Chen Liding, Wang Wei et al. Correlating landscape pattern with total nitrogen concentration using a location-weighted sink-source landscape index in the Haihe River Basin, China. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 1784-1788. [孙然好, 陈利顶, 王伟等. 基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价. *环境科学*, 2012, 33(2): 1784-1788.]
- [5] Liu Yu, Lu Yihe, Fu Bojie. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 267-275. [刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局: 土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. *生态学报*, 2011, 31(1): 267-275.]
- [6] Huang C, Geiger E L, Kupfer J A. Sensitivity of landscape metrics to classification scheme. *International Journal of*

- Remote Sensing, 2006, 27: 2927-2948.
- [7] Saura S, Martinez M J. Sensitivity of landscape pattern metrics to map spatial extent. Photogrammetric Engineering and RemoteSensing, 2001, 67(9): 1027-1036
- [8] Evelyn U, Jri R, Blo M. Scale dependence of landscape metrics and their indicatory value for nutrient and organic matter losses from catchments. Ecological Indicators, 2005, 5(4): 350-369.
- [9] Chen Liding, Fu Bojie, Xu Jianying et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2406-2413. [陈利顶, 傅伯杰, 徐建英 等. 基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法: 景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.]
- [10] Yan Li, Zhen Lin, Xie Gaodi et al. Effects on changing grain size of landscape indices in Jinghe Watershed. Resources Science, 2007, 29(2): 183-187. [杨丽, 甄霖, 谢高地 等. 泾河流域景观指数的粒度效应分析. 资源科学, 2007, 29(2): 183-187.]
- [11] Robert C C, Joan I N. Limitations of using landscape pattern indices to evaluate the ecological consequences of alternative plans and design. Landscape and Urban Planning, 2005, 72: 265-280.
- [12] Zhang Qiang, Zhang Xinshi. Impacts of predictor variables and species models on simulating Tamarix ramosissima distribution in Tarim Basin, northwestern China. Journal of Plant Ecology, 2012, 5(3): 337-345.
- [13] Qi Chuhua. Study on the Relationship between the Erosion and Water Loss and Soil Erosion on the Loess Plateau. Xi'an: Shaanxi People's Education Press, 1991: 210. [齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991: 210.]
- [14] Compiling Committee of Shaanxi Local Chronicles. Shaanxi Province: Geography. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2000: 731-738. [陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志: 地理志. 西安: 陕西人民出版社, 2000: 731-738.]
- [15] Department of Geography of Shaanxi Normal University. Geography of Yan'an. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2000: 731-738. [陕西师范大学地理系. 延安地理志. 西安: 陕西人民出版社, 2000: 731-738.]
- [16] ArcSWAT2.1 Interface For SWAT2005, Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station, <http://wenku.baidu.com/view/be1efcd9ce2f0066f533221b.html>.
- [17] Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 121-125. [陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.]
- [18] He Peng, Zhang Huiru. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics. Forest Research, 2009, 22 (4): 470-474. [何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究. 林业科学研究, 2009, 22(4): 470-474.]
- [19] Landscape Pattern. <http://wenku.baidu.com>, 2012-11-25. [景观格局. 互联网文档资源 <http://wenku.baidu.com>, 2012-11-25.]
- [20] Wang Xinming, Wang Changyao, Zhan Yulin et al. A factor analysis on landscape structure metrics with large scale. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(1): 17-21. [王新明, 王长耀, 占玉林 等. 大尺度景观结构指数的因子分析. 地理与地理信息科学, 2006, 22(1): 17-21.]
- [21] Li Hongliang. Study on the impacts of land use/land cover change to the hydrological based on the SWAT model [D]. Shijiazhuang: Hebai Normal University, 2007. [李宏亮. 基于SWAT模型的土地利用/覆被变化对水文要素的影响研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2007.]
- [22] Fu B J, Zhao W W, Chen L D et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China. Land Degradation & Development, 2005, 16: 73-85.
- [23] Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7-13. [张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.]
- [24] Zhang Leina, Li Xiubin, Wang Zhaofeng et al. Study and application of SWAT Model in the Yunzhou Reservoir Basin. Hydrology, 2004, 24(3): 4-8. [张蕾娜, 李秀彬, 王兆锋 等. 一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨: SWAT模型在云州水库流域的应用研究. 水文, 2004, 24(3): 4-8.]
- [25] Ren manli. Research of runoff simulation in Ebinur Lake Basin based on SWAT Model [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013. [任曼丽. 基于SWAT模型的艾比湖流域径流模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013.]
- [26] Wang Lei. Study on physical watershed hydrological model based on triangulated irregular network [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. [王蕾. 基于不规则三角形网格的物理性流域水文模型研究. 北京: 清华大学, 2006.]
- [27] Wang Zhonggen, Liu Changming, Zuo Qiting et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439. [王中根, 刘昌明, 左其亭 等. 基于DEM的分布式水文模型构建方法. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439.]

Landscape pattern and hydrological processes in Yanhe River basin of China

LI Jing, ZHOU Zixiang

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: As a typical experimental Soil and Water Conservation District, the Yanhe River basin has long been plagued by soil erosion due to severe human disturbances. The 'Grain-For-Green' project has been practiced to increase grain yield to feed the mass population in starvation and curbed the continually deteriorating ecological situation. It is importantly scientific to explore watershed landscape pattern and hydrological processes. Exerting remote sensing and geographic information technology, this paper firstly analyzed simulated ecological hydrological process in the Yanhe River basin based on SWAT model. On this basis, it applied landscape indices method, land use change on eco-hydrological processes was quantitatively described, particularly those soil erosion influences caused by the change of landscape pattern with the complicated topography and soil type status; then we defined the landscape unit including topography, soil and land use/land cover change (LUCC) information, constructed a comprehensive landscape indices which was closely related to soil erosion, and reflected the coupling relationship between regional landscape pattern change and soil erosion. The results are as follows: (1) this paper constituted the spatial heterogeneity of hydrological response units (HRUs) by several factors such as land use type, soil type, topography, etc. At the landscape level, seven landscape indices were selected with principal component factor analysis, which are DCAD, GYRATE_SD, COHESION, SHEI, TCA, PAFRAC, IJI, etc. Coupled analysis on relationships of landscape indices, annual runoff and annual sediment in each sub-basin, the correlation coefficient of seven selected landscape indices and runoff is very small and cannot pass all significant tests. But correlation among the indices except for TCA and IJI and sediment yield is significant; the absolute value of the correlation coefficient is between 0.3 and 0.5. (2) This paper built Slope-HRU landscape index: coupling relationship between Slope-HRU landscape indices and annual sediment in each sub-basin is very comprehensible, and correlation coefficient is - 0.6, which is significantly negatively correlated. Based on 'source-sink' landscape theory of soil erosion, Slope-HRU landscape index was fabricated to reflect the relationship between landscape pattern and soil erosion process to a certain extent. According to the space distribution of R value of Slope-HRU landscape index in 41 sub-basins, the results showed that: in the sub-basin scale, Slope-HRU landscape indices and annual sediment have obvious regional differentiation regularity. And R value spatial variation of Slope-HRU landscape indices and the variation of annual sediment amount were on contrary. On the other hand, the R value increased from southeast to northwest, with annual sediment decreasing from southeast to northwest.

Key words: Yanhe River basin; landscape pattern; hydrological processes; hydrological response units (HRUs); landscape index