

基于格局_过程理论的非点源污染实证研究:以黄土丘陵沟壑区水土流失为例

索安宁^{1,2}, 王天明¹, 王辉¹, 于波¹, 葛剑平¹

(1. 北京师范大学生态学研究所, 北京 100875; 2. 国家海洋环境监测中心, 大连 611023)

摘要: 非点源污染是影响地表环境的主要污染方式之一. 针对黄土高原丘陵沟壑区水土流失这一典型的非点源污染问题, 应用非点源污染的空间识别方法——景观空间负荷对比指数和景观坡度指数, 对黄土高原泾河流域 12 个子流域进行了实证研究. 结果表明, 耕地、低覆盖度草地和各种林地的景观坡度指数和景观空间负荷对比指数对流域土壤侵蚀模数有显著的响应关系, 对径流深度存在着一定的响应关系, 而对径流变异系数和侵蚀变异系数没有明显的响应. 说明景观空间负荷对比指数和景观坡度指数对流域水土流失具有一定的指示作用, 可作为水土流失等非点源污染空间风险评价的 1 个有用方法.

关键词: 非点源污染; 水土流失; 黄土高原; 景观坡度指数; 景观空间对比负荷指数

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2415-06

Empirical Study on Non-point Sources Pollution Based on Landscape Pattern & Ecological Processes Theory: A Case of Soil Water Loss on the Loess Plateau in China

SUO An_ning^{1,2}, WANG Tian_ming¹, WANG Hui¹, YU Bo¹, GE Jian_ping¹

(1. Institute of Ecological Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. National Ocean Environment Monitor Center, Dalian 611023, China)

Abstract: Non-point sources pollution is one of main pollution modes which pollutes the earth surface environment. Aimed at soil water loss (a typical non-point sources pollution problem) on the Loess Plateau in China, the paper applied a landscape pattern evaluation method to twelve watersheds of Jinghe River Basin on the Loess Plateau by means of location weighted landscape contrast index (LCI) and landscape slope index (LSI). The result showed that LSI of farm land, low density grass land, forest land and LCI responded significantly to soil erosion modulus and responded to depth of runoff, while the relationship between these landscape index and runoff variation index and erosion variation index were not statistically significant. This tells us LSI and LWLCI are good indicators of soil water loss and thus have big potential in non-point source pollution risk evaluation.

Key words: non-point sources pollution; soil water loss; the Loess Plateau; landscape slope index; location-weighted landscape contrast index

水土流失是目前人们关注的主要生态过程之一,也是非点源污染的一种主要形式.水土流失引起的农业非点源污染问题是全球关注的焦点,据报道,在美国水土流失引起的水质污染已造成 22~70 亿美元的经济损失^[1,2].水土流失的产生和迁移与地表景观的空间分布格局密切相关.由于土地利用方式和人类活动强度的差异,不同类型景观中产生和输出的水土流失负荷有很大的差异^[3].景观生态学研究的一项重要研究内容是景观格局与生态过程的关系问题,目前研究景观格局与水土流失过程时,更多的是利用小区的观测试验结果来推断大尺度上景观(土地利用)格局对水土流失过程的影响,但是,许多研究表明,随着尺度增加,水土流失过程的发生机制会发生明显的改变^[1~5].异质景观内不同的土地利用格局深刻影响着流域的径流和产沙过程,如

何从景观尺度上,探索不同景观格局对流域水土流失过程的影响,将流域水土流失过程与景观格局结合起来是目前景观生态学面临的一个重要难题^[4~6].本研究针对黄土高原丘陵沟壑区水土流失这一突出非点源污染问题,通过分析不同景观类型及其空间分布格局在水土流失过程中的地位和作用,应用跨越空间尺度的非点源污染的景观格局识别方法^[7],试图以黄土高原泾河流域为例,对这种非点源污染的景观格局识别方法进行实证验证和评价,为非点源污染的空间识别探索适用的方法.

收稿日期: 2005-08-20; 修订日期: 2005-12-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB111507); 国家科技攻关计划项目(2004BA508B22)

作者简介: 索安宁(1977~),男,博士,主要研究方向为景观生态与区域生态系统评价, E-mail: san720@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: gejp@bnu.edu.cn

1 基于格局-过程理论的非点源污染空间识别方法

“源-汇”理论认为一切物种都存在其最初产生的“源”和最终消亡的“汇”. 在非点源污染形成过程中, 一些景观类型起到了污染物“源”的作用, 另一些景观类型可能滞蓄污染物, 因而起到“汇”的作用, 同时一些景观(比如河流水体)起到了传输的作用^[8]. 如果流域中“源”“汇”景观在空间上分布达到了平衡状态, 形成合理的空间分布格局, 流域会产生较少的污染物输出; 反之, 如果流域景观格局分布不合理, 并有较多的“源”集中分布, 而缺乏“汇”的滞蓄作用, 流域将会有较多的污染物输出产生. 如何判断流域的“源”“汇”景观格局的合理性对于研究 1 个区域非点源污染过程具有重要意义.

陈利顶提出借用洛伦兹曲线理论来确定“源”、“汇”在空间的分布格局. 他以各类景观类型的空间分布与流域出口进行比较, 计算不同景观单元随距离、相对高度和坡度等空间距离递增的面积累积百分比曲线, 用这种景观面积累积曲线来表示各类景观类型在空间距离上的分布格局. 并从各类景观类型的“源”“汇”作用来考虑, 将不同景观类型划分为对非点源污染物产生过程起到“源”作用和起到“汇”作用 2 种类型, 构成“源”“汇”景观空间负荷对比指数^[7]. 依据景观负荷对比指数值的大小, 来判断“源”“汇”景观在流域内分布的空间格局, 以反映污染物发生的风险程度^[8].

这种将具有空间属性的景观格局, 通过比较分析各类景观类型对研究目标的贡献, 获得的综合评价指标, 可以较好地將景观空间分布格局与非点源污染过程结合起来, 在非点源污染空间大尺度风险评价方面很有意义^[8,9]. 但这种非点源污染风险评价方法的可靠性尚需不同的非点源污染过程的实例研究去验证与评价.

2 实证研究

2.1 研究区概况

泾河流域位于黄土高原腹地, 106°20′~108°48′E, 34°24′~37°20′N, 处于六盘山和子午岭之间, 流域绝大部分属于陇东黄土高原, 流域面积 45 421 km². 流域气候为典型的温带大陆性气候, 处于温带半湿润向半干旱气候的过渡地带. 据流域各气象站点多年观测资料, 流域多年平均气温 8℃, 最冷月平均气温 -8~-10℃, 最热月平均温度 22~24℃, 年降水量在 350~600mm 之间, 主要集中于夏季, 夏季

降水量一般占到年降水量的 50% 以上, 且降水强度大, 年际变化也很大.

流域黄土层深厚, 一般在 50~80m 不等, 部分黄土残塬黄土厚达 100m 以上. 土壤为典型的黄绵土和黑垆土, 结构疏松, 极易塌陷、流失. 植被为温带森林草原过渡类型, 流域北部为典型温带草原, 由于开发历史悠久, 原始植被已受人类活动破坏极大, 农业用地和草地为流域目前的主要土地利用类型.

泾河及各级支流均深切于梁、塬、峁和黄土沟壑镶嵌的黄土地貌景观中, 流域内地形支离破碎, 沟壑纵横, 水系较发达, 集水面积大于 1 000 km² 的主要支流有 13 条, 大于 500 km² 的支流有 26 条, 长 1~2 km² 的冲刷沟系十分发育, 多达上万条, 是黄土高原水土流失最严重的区域之一.

2.2 水土流失的空间识别方法

目前在研究景观格局与水土流失时, 更多的是利用小尺度的观测试验结果来推断大中尺度上土地利用格局对水土流失的影响^[4]. 许多研究认为这种小尺度实验结论不能应用于大尺度的水土流失风险评价^[5]. 陈利顶提出的非点源污染空间识别方法对大尺度水土流失风险评价很有启示^[7], 本研究以泾河流域水土流失过程为实证对该方法进行补充和修正, 并用几种水土流失指标对其进行验证.

地形被认为是影响流域水文过程的重要因素, 尤其是坡度对流域的水、沙输移具有重要的影响^[10]. 一般“源”景观单元分布的坡度越小, 水、沙流失的可能性就越小, “汇”景观单元分布的坡度越小, 其滞蓄水、沙的可能性越大; 相反, 如果“源”景观单元分布的坡度越大, 水、沙流失的可能性就越大, “汇”景观单元分布的坡度越大, 其水、沙滞蓄的可能性就越小. 因此, 本研究以坡度作为 1 个景观空间分布因素, 用洛伦兹曲线来描绘不同景观类型在坡度递增过程中的面积累积曲线, 可以表示为图 1.

图 1 中, ODB, OFB 分别表示不同景观类型随坡度增加的面积累积曲线. OEB 表示沿坡度绝对对均匀分布的分布曲线. 对于任何 1 个流域都可以得出每 1 种景观类型的坡度空间分布的面积累积曲线. 为了表征每种景观类型在坡度空间上的分布特征, 假设以每 1 种景观类型全部分布在 0 坡度(OAB)为其理想空间分布格局, 用这种景观理想分布格局与其实际坡度空间分布进行比较, 可以构建成景观坡度指数, 公式如(1)式:

$$LSI_i = C_i \frac{S_{OABC}}{S_{OFBC}} \quad (1)$$

式中, LSI_i 为第 i 景观类型的坡度指数, C_i 为第 i 景观类型在流域中占的比例, S_{OFBC} 表示第 i 景观类型的面积累积曲线构成的不规则多边形面积, S_{OABC} 表示其全部分布在 0 坡度时的理想格局下的面积累积曲线构成的不规则多边形面积. LSI 的值越大, 表示景观类型分布的坡度越大, 对水土流失过程的影响越大.

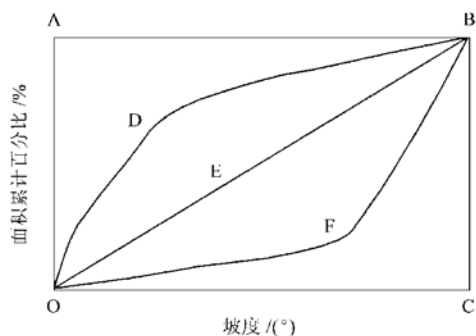


图 1 景观类型坡度分布的洛伦兹曲线
Fig. 1 Scheme figure of slope distribution of landscape types in watershed

在流域水土流失过程中, 不同景观类型对水土流失过程的影响差异较大, 在研究区农田、裸地和低密度草地、居住用地等是水、沙流失的“源”, 而森林、灌丛、高密度草地可以截留、滞蓄坡面水、沙, 在一定程度上起到“汇”的作用^[11, 12]. 由于这些土地利用类型的性质和受人为干扰的程度不同, 它们在水、沙流失和滞蓄过程中发挥的功能差异较大, 为了客观地评价它们在水土流失过程中的作用, 需要对不同的景观类型根据其在水土流失过程中的作用进行权重赋值. 另外, 为了考虑流域中“源”、“汇”景观类型总量的贡献和降水量的流域差异, 需要将各类景观类型的面积百分比和流域降水比重引入到计算公式中, 因此, 可以将公式 (1) 改进为 (2) 式:

$$LCI_x = R_x \left| \frac{\sum_{i=1}^{12} S_{ODBC} \times W_{ix} \times PC_{ix}}{\sum_{j=1}^{12} S_{OFBC} \times W_{jx} \times PC_{jx}} \right| \quad (3)$$

其中, LCI_x 为第 x 流域景观空间对比负荷指数, W_i 、 W_j 分别表示第 i 种“源”景观和第 j 种“汇”景观在水土流失中的权重. 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 是根据植被反射波段的特性计算出来的反映地表植被生长情况、覆盖情况、生物量情况和植被种类情况的间接指标, 被广泛应用于植被覆盖的定量研究, 研究认

为黄土高原植被覆盖程度对水土流失有重要的影响^[12], 所以本研究以每种景观类型多年夏季平均 NDVI 值作为其在水土流失中的权重, NDVI 值来自 MODIS (500M) 2001~2004 数据^[13]; PC_{ix} 、 PC_{jx} 分别表示第 i 种“源”景观和第 j 种“汇”景观在 x 流域中所占的百分比; R_x 表示第 x 子流域的降水权重, 为泾河流域 12 个子流域多年平均降水量的比例 (采用多年平均降水量空间插值计算每个子流域的平均降水量)^[14], m 表示有 m 种“源”景观类型, n 表示有 n 种“汇”景观类型.

2.3 景观格局指数的计算

应用中国资源环境数据库中 2000 年的泾河流域部分作为基本土地利用数据^[15]. 地形数据采用中国科学院地理与资源研究所提供的 1:25 万地形. 在地理信息系统软件 Arc-Info 支持下建立泾河流域数字高程模型 (DEM), 在此基础上生成流域坡度图, 并将泾河流域划分为 15 个子流域^[16]. 将泾河流域土地利用数据与坡度数据叠加, 并绘制每个子流域每种土地利用类型的洛伦兹曲线, 采用梯形积分 (Trapezoidal integration) 计算每种土地利用类型的洛伦兹曲线多边形面积, 可以得出每个子流域每种土地利用类型的景观坡度指数和景观空间负荷对比指数.

2.4 水土流失指标的计算

水土流失数据以黄河水利委员会水文局提供的 1958~2002 年的泾河流域水文数据为基础, 选取子流域下游出水口处有长期水文观测资料或上、下游都有长期水文观测资料的 12 个子流域为分析样区. 在每个样区中, 利用现有的水土流失数据构建并测算出了 4 个水土流失过程的特征指标: 径流深度、径流变异系数、侵蚀模数、侵蚀变异系数分别表示子流域单位面积多年平均产生径流量、年径流量多年离差、多年平均单位面积的泥沙流失量、泥沙流失量的多年离差^[14].

2.5 景观指数对水土流失指标的响应

按照上述方法计算出每个子流域的景观坡度指数和景观空间对比负荷指数, 统计出每个子流域的多年平均径流深度、径流年际变化、侵蚀模数、侵蚀年际变化, 代表每个子流域的水土流失平均状况, 得到研究区每个子流域的景观格局指数和与其对应的水土流失指标.

表 1 的监测结果表明, 当子流域内农田景观坡度指数在 0.50 以上时 (如环江上游、洪河、蒲河子流域), 其多年土壤侵蚀模数的监测值都大于 6 000

t/km^2 , 多年径流深度都小于 60mm, 随着农田景观坡度指数的减小, 土壤侵蚀模数也逐渐减少, 在农田坡度指数最小的合水川子流域, 土壤侵蚀模数为 $1\,699.21\text{ t}/\text{km}^2$; 除三水河和合水川子流域外, 流域内其他子流域的森林、疏林和灌丛景观坡度指数都比较小, 而林地坡度指数最大的三水河和合水川子流域的土壤侵蚀是流域内土壤侵蚀模数最小的 2 个子流域; 低覆盖度草地坡度指数也是在土壤侵蚀模数比较大的环江上、下游比较大(分别为 0.373、0.235), 在土壤侵蚀比较小的三水河等子流域比较小(仅为 0.007), 而在土壤侵蚀模数达 $9\,235.07\text{ t}/\text{km}^2$ 的洪河子流域, 低覆盖度草地的坡度指数也仅为 0.039, 这可能是因为洪河子流域土地利用以农

田为主, 农田是最主要的泥沙来源, 中、高覆盖度草地坡度指数与土地侵蚀模数没有明显的关系, 可能是中、高覆盖度草地在流域水土流失“源-汇”分配中的作用不是很明显的原因. 各种景观坡度指数对流域径流深度、径流年际变化和侵蚀年际变化也没有明显的响应关系. 这些分析表明, 农田坡度指数对土壤侵蚀具有很好的响应, 农田土地利用, 尤其是陡坡农田的土地利用方式可以明显地加剧流域土壤侵蚀; 各类林地坡度指数对土壤侵蚀也具有较好的响应, 陡坡林地可以有效地保持水土, 减小流域土壤侵蚀; 低覆盖度草地坡度指数具有和农田一致的水土流失响应; 中、高覆盖度草地对土壤侵蚀响应不明显. 各景观坡度指数对流域径流深度、径流年际变化

表 1 泾河流域景观格局指数与水土流失指标监测结果

Table 1 Landscape pattern indexes and monitoring soil water loss results in Jinghe River Basin

子流域	景观坡度指数							空间负荷 对比指数	水土监测结果			
	森林	疏林	灌丛	农田	高覆盖 度草地	中覆盖 度草地	低覆盖 度草地		径流深 度/mm	径流 年际变化	侵蚀模 数/ $\text{t}\cdot\text{km}^2$	侵蚀 年际变化
环江上游	0.002	0.008	0.014	0.721	0.067	0.027	0.373	0.162	13.000	0.60	7 589.283	0.881
环江下游	0.002	0.007	0.051	0.593	0.261	0.125	0.235	0.648	18.461	0.42	6 858.574	0.778
东川	0.001	0.027	0.076	0.483	0.241	0.329	0.113	0.675	25.662	0.51	6 080.709	1.121
蒲河	0.008	0.018	0.019	0.609	0.153	0.234	0.146	0.381	31.153	0.32	6 281.162	0.753
合水川	0.026	0.155	0.136	0.197	0.222	0.384	0	1.713	59.854	0.61	1 699.210	1.091
茹河	0.003	0.022	0.030	0.441	0.215	0.297	0.150	0.548	33.920	0.44	5 405.000	0.670
洪河	0.007	0.016	0.015	0.587	0.187	0.303	0.039	0.420	42.511	0.48	9 235.070	1.011
泾河	0.023	0.108	0.087	0.496	0.219	0.208	0.007	1.030	165.859	0.52	5 172.001	1.482
黑河	0.005	0.083	0.080	0.426	0.209	0.291	0.017	0.916	103.122	0.62	2 974.673	0.821
黑河	0.004	0.029	0.037	0.508	0.326	0.291	0.003	0.856	59.653	0.49	6 579.000	0.682
达奚河	0.068	0.013	0.088	0.438	0.275	0.330	0.006	1.056	61.451	0.48	2 867.690	0.711
三水河	0.461	0.048	0.190	0.235	0.098	0.196	0.007	3.56	62.478	0.56	1 949.212	0.913

和侵蚀年际变化均没有明显的响应关系.

从图 2 的景观空间负荷对比指数对 4 种水土流失指标的响应关系可以看出, 径流深度随景观空间负荷对比指数的增大而增加, 具有指数上升的趋势, 二者之间相关显著 ($F = 11.83, p < 0.05$); 侵蚀模数随景观空间负荷对比指数的增大而减小, 呈对数下降的趋势, 二者之间也存在显著相关关系 ($F = 26.90, p < 0.01$); 径流变异系数和侵蚀变异系数对景观空间负荷对比指数的变化没有明显的响应关系 ($F = 1.90; F = 1.05$). 由此可以看出, 景观“源”、“汇”类型在坡度空间上的分布格局对流域的径流深度和侵蚀模数具有显著的响应关系, 而对标识径流和输沙年际变化势态的径流变异系数和侵蚀变异系数没有明显的响应, 说明景观空间分布格局对流域水土流失的量有重要的影响, 而对水土流失的年际变化的作用不是很明显.

3 讨论

目前研究非点源污染中的最大难点是影响非点源污染形成的不确定因素太多, 形成过程复杂多变, 现有的非点源污染模型往往是模拟客观条件下非点源在空间的传输迁移过程及其非点源污染物在空间上的可能分布特征, 其前提假设一些影响因子在非点源污染形成过程中处于不变状态. 实际上, 有不同地形地貌、土壤、植被和人类活动共同组成的复杂生态系统中, 各种生态因子在时刻发生着变化, 由此导致形系统的物流和能流复杂多变, 在如此复杂系统中, 模拟研究养分元素的时空运移过程将十分困难^[17~20].

景观指标作为描述景观格局的 1 种有用手段被广泛应用于景观生态学的研究之中, 然而, 随着数字化景观数据的容易获得和 GIS 的广泛应用, 目前很

多研究只关注景观指数的分析和描述,忽略了对这些景观指数的意义或内涵的理解^[21~27]. 本研究中探讨的景观坡度指数和景观空间负荷对比指数都是针对非点源污染的发生过程而构建的,其指数值的大小对应着非点源污染发生的风险程度,具有深刻的生态过程意义. 但是景观坡度指数和景观空间负荷对比指数都是相对值,对于环境背景相似的流域,景观坡度指数和景观空间负荷对比指数越大,流域

非点源污染的风险越大,反之越小. 对于土壤属性等环境背景差异较大的流域,计算出的景观空间格局指数不具备可比性. 由于景观空间负荷对比指数没有考虑影响非点源污染形成的其他因素,如土壤等,所以该评价模型更适合于土壤和降水条件比较相似的地区,对于土壤等其他因素差异较大的地区,在利用该方法进行景观格局研究时,应作相应的修正^[28].

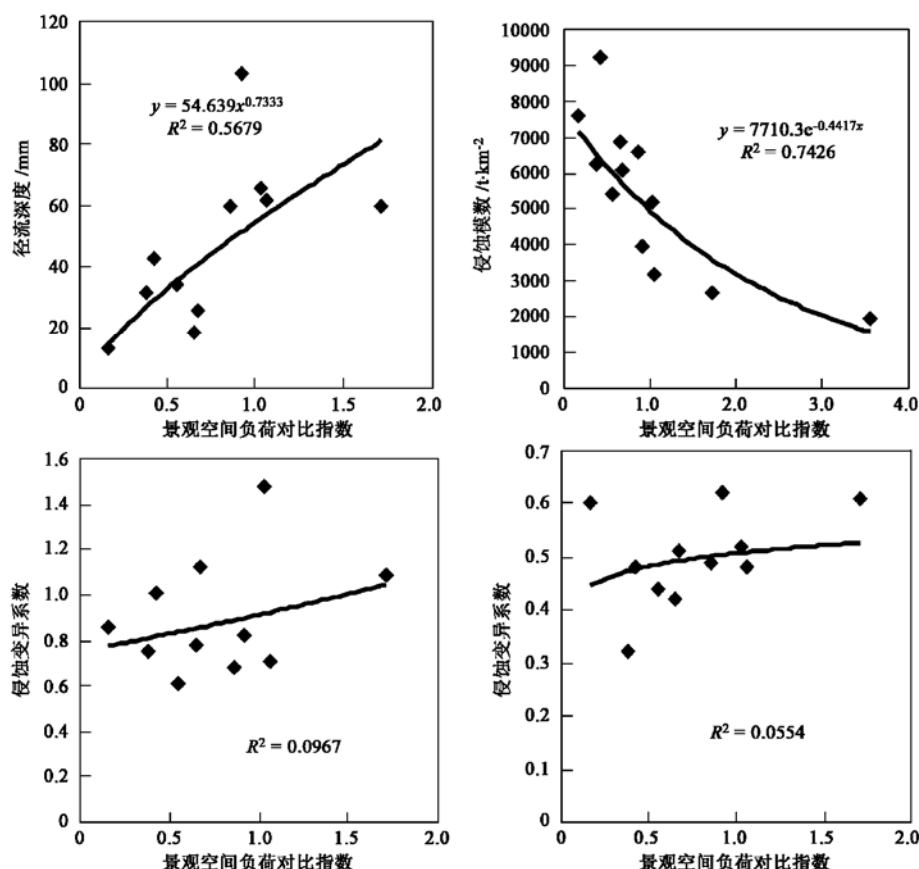


图2 景观空间负荷对比指数对水土流失指标的响应

Fig. 2 Soil water loss indices response to location-weighted landscape contrast index

4 结论

耕地坡度指数和低覆盖草地坡度指数及各种林地的坡度指数与流域侵蚀模数有较好的响应关系;中、高覆盖度草地坡度指数与流域侵蚀模数响应关系不明显;各种景观坡度指数与流域径流深度、径流年际变化和侵蚀年际变化都没有明显响应关系;流域侵蚀模数随景观空间负荷对比指数的增大呈显著的指数下降趋势,流域径流深度随景观空间负荷对比指数增大存在上升趋势,径流变异系数和侵蚀变异系数与景观空间对比指数没有明显的响应关系. 说明景观空间负荷对比指数和景观坡度指数对流域

水土流失,尤其是对流域土壤侵蚀具有很好的指示作用,可以作为流域水土流失和其他非点源污染空间风险评价的有用方法.

参考文献:

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses — a guide to conservation planning[M]. USDA Agricultural Handbook, 1978.
- [2] Shi H, Shao M G. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environment, 2000, 45: 9~ 20.
- [3] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, et al. Relationship between landscape characteristics and Nonpoint sources pollution inputs to coastal Estuaries[J]. Environ. Manage., 1999, 23(4): 539~ 549.

- [4] Bergkam P G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrub lands[J]. *Catena*, 1998, **33**(3~ 4): 201~ 220.
- [5] Pennock D-J, de John E. Spatial pattern of soil redistribution in Boroll landscape. Southern Saskatchewan, Canada[J]. *Soil Sci.*, 1990, **150**(6): 867~ 873.
- [6] Martz L W, de John E. Using cesium-137 to assess the variability of net soil erosion and its association with topography in a Canadian prairie landscape[J]. *Catena*, 1987, **14**: 439~ 451.
- [7] 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[J]. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2406~ 2413.
- [8] Phillips J D. Non point sources pollution control effectiveness of riparian forest along a coastal plain river[J]. *J. Hydrol.*, 1989, **110**: 221~ 237.
- [9] Tim U S, Jolly R, Liao H. Impact of landscape feature and featurement on agricultural riparian zone: distributed modeling [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1993, **28**: 13~ 23.
- [10] Moore J D, Burch G J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation[J]. *Soil Sci. J.*, 1986, **50**: 1294~ 1298.
- [11] 王晗生, 刘国彬, 王青宁. 流域植被整体防蚀作用及景观结构剖析[J]. *水土保持学报*, 2000, **10**(5): 73~ 78.
- [12] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持[M], 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [13] 索安宁, 于波, 王天明, 等. 泾河流域植被景观格局对流域径流的调节作用[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(4): 40~ 43.
- [14] 索安宁, 洪军, 林勇, 等. 黄土高原景观格局与水土流失的关系研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(9): 1719~ 1723.
- [15] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. *地理研究*, 2003, **22**(1): 1~ 12.
- [16] Ziverts A. Mathematic model of hydrological process METQ98 and its application[J]. *Nordic Hydrology*, 1999, **30**(2): 109~ 128.
- [17] 高超, 朱继业, 窦贻俭, 等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. *生态学报*, 2004, **24**(1): 109~ 116.
- [18] 苑韶峰, 吕军. 流域农业非点源污染研究概况[J]. *土壤通报*, 2004, **35**(4): 207~ 511.
- [19] 郑一, 王学军. 非点源污染的研究进展与展望[J]. *水科学进展*, 2002, **13**(1): 105~ 110.
- [20] O' Neil R V, Hunster C T, Jones K B, *et al.* Monitoring environmental quality at the landscape scale: using landscape indicators to assess biotic diversity, watershed integrity, and landscape stability[J]. *Bioscience*, 1997, **47**(8): 513~ 519.
- [21] He H S. An aggregation index(AI) to quantify spatial patterns of landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2000, **15**(7): 591~ 601.
- [22] Olsen E R, Ramsey R D, Win D S. A modified fractal dimension as a measure of landscape diversity [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, **59**: 1517~ 1520.
- [23] Turner M G, Gardner R H. Quantitative methods in Landscape Ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 1990. 3~ 16.
- [24] Haines -Young R H, Chopping M. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes[J]. *Progress in Physical Geography*, 1996, **20**: 418~ 445.
- [25] Forman R, Godron M. Landscape ecology[M]. New York : John Wiley & Sons, 1986.
- [26] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [27] 肖笃宁. 国际景观生态学研究最新进展[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(6): 75~ 76.
- [28] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. *环境科学*, 2000, **21**(2): 98~ 100.