

黄土丘陵小流域土壤侵蚀的时空变异及其影响因子

邱 扬¹, 傅伯杰², 王 军³, 陈利顶²

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 中国科学院生态环境研究中心系统生态开放实验室, 北京 100085; 3. 国土资源部土地整理中心, 北京 100035)

摘要:采用土壤侵蚀模型 LISEM(Limburg Soil Erosion Model)模拟黄土丘陵沟壑区大南沟小流域 5 种土地利用格局下立地尺度上土壤侵蚀量的空间分布,从土壤侵蚀量与环境因子的关系分析入手,研究黄土丘陵小流域立地尺度上土壤侵蚀的时空变异及其影响因子。研究结果表明,立地尺度上平均土壤侵蚀强度以 1975 年 > 1998 年 > 退耕格局,可见优化土地利用格局(陡坡农地退耕)可以有效地降低立地尺度上的土壤侵蚀强度。各种土地利用方案下土壤侵蚀强度的空间变异都很显著,相对来说以 1975 年 < 1998 年 < 退耕格局,可见优化土地利用格局可以提高土壤侵蚀的空间变异性,降低土壤侵蚀危险的空间聚集度。土壤侵蚀量与降雨呈现显著正相关性,相关性以 LU75 > LU98 > 退耕格局,可见合理的土地利用格局可以有效地削弱降雨对土壤侵蚀强度的影响。土地利用方式对土壤侵蚀空间分布具有显著影响。从 1975 年、1998 年到 3 种退耕格局,陡坡农地退耕还林还草,植被覆盖度增加,林地/灌木地、果园/经济林地、农地和休闲地的平均土壤侵蚀强度都逐渐降低。相关分析表明,林地/灌木地上土壤侵蚀量最小,荒草地相对最严重;果园、休闲地和农地居中。土壤侵蚀强度还存在显著的地形分异。水平凹凸度和相对海拔对土壤侵蚀空间分布的影响比较显著,而坡向、坡度和垂直凹凸度的影响较小。土壤侵蚀强度以水平凸坡大于水平凹坡、垂直凹坡略大于垂直凸坡、偏南坡大于偏北坡、低海拔大于高海拔。对 1975 年和 1998 年土地利用格局来说,土壤侵蚀强度以偏西坡大于偏东坡、陡坡大于缓坡;对 3 种退耕格局而言则正相反。可见,优化土地利用格局(陡坡农地退耕),可以有效地削弱甚至逆转地形对土壤侵蚀强度的影响。

关键词:黄土丘陵区;土壤侵蚀;时空变异;降雨;土地利用类型;地形因子

Spatiotemporal variability of the soil erosion and its relations to the influencing factors on the Loess Plateau, China

QIU Yang¹, FU Bo-Jie², WANG Jun³, CHEN Li-Ding² (1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Systems Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1871 ~ 1877.

Abstract: Based on the soil erosion modeling for five land use scenarios consisting of the previous in 1975 (LU75), present in 1998 (LU98), and future land use pattern (i. e. steep-slope-limit, FA) in which cropland areas are restricted slope gradients smaller than 25 (FA25), 20 (FA20) and 15 degree (FA15) using LISEM (Limburg Soil Erosion Model), the degree of spatiotemporal variability of the soil erosion and the ability of environmental attributes to predict that spatial variability were studied in Da Nangou catchment (3.5km²) on the Loess Plateau, China. It is indicated that the mean soil erosion is the most significant for land use in 1975, moderate for land use in 1998 and weakest for three steep-slope-limit, which demonstrates that

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40201003);国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90102018);中国科学院系统生态重点实验室基金资助项目(200301);国土资源部百人计划资助项目(200201)

收稿日期:2004-03-27;修订日期:2004-07-06

作者简介:邱扬(1969~),男,博士,副教授,主要从事景观生态与土地质量、干扰生态与植物生态、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:qiuyang69@263.net qiuyang69@sohu.com

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40201003 and 90102018), Foundation of Key Lab. for Systems Ecology, CAS(No. 200301), Program of Excellent Young Scientists of the Ministry of Land and Resources of China (No. 200201)

Received date: 2004-03-27; **Accepted date:** 2004-07-06

Biography: QIU Yang, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in landscape ecology and land quality, disturbance ecology and plant ecology, soil erosion and soil & water conservation. E-mail: qiuyang6a@263.net

improvement of the land use pattern could lead to declining in soil erosion at site scale. The spatial variability in soil erosion is very significant, however, it shows the following rank for different land use scenarios; LU75<LU98<FA. This indicates that spatial variation in soil erosion increases with optimization of land use pattern, and so the spatial aggregation in soil erosion risk declines significantly, too. It is found that the soil erosion increases with increasing of precipitation and rainfall intensity, however the correlation between soil erosion and rainfall is most significant for LU75, moderate for LU98 and lowest for the three steep-slope-limit scenarios, which shows that appropriate land use pattern can reduce the influence of rainfall upon the soil erosion significantly. It is indicated that landuse also provides significant influences on the spatial distribution of soil erosion. From LU75, through LU98 to FA, the cropland on the steep slope was replaced by the wasteland or woodland/shrubland gradually, with increasing vegetation coverage, the mean soil erosion on the woodland/shrubland, orchard/cashing-tree land, cropland and following land decrease too. It is demonstrated that the soil erosion shows the lowest values on the woodland/shrubland, while its exhibits the highest values on the wasteland. The soil erosion also shows significant spatial variation in relation to topography, in which plan curvature and relative elevation exhibit a more significant influences on the spatial distribution of soil erosion than the aspect, slope and profile curvature do. It is found that the soil erosion exhibits a higher value on south-toward slope than north-toward slope, plan-convex slope than plan-concave slope, profile concave slope than profile convex slope, and it increases with decreasing elevation. For the land use in 1975 and 1998, the soil erosion is more significant on west-toward slope than east-toward slope, steep slope than flat slope, while for the three degree-limit scenarios the soil erosion demonstrates an opposite trend. This indicated that the appropriate land use pattern (steep-slope-limit scenarios) could significantly reduce the influence of topography upon the soil erosion.

Key words: the Loess Plateau; soil erosion; spatiotemporal variability; rainfall; land use types; terrain indices

文章编号:1000-0933(2004)09-1871-07 中图分类号:Q149,S157.1 文献标识码:A

小流域尺度土壤侵蚀的时空变异研究是土地持续利用的基础^[1~3]。土壤侵蚀的时空变异是指在一定的景观内,不同时间不同地点的土壤侵蚀特征存在明显的差异性和多样性。土壤侵蚀的时空变异是多重尺度上的植被、土地利用、气象(降雨)、地形和土壤等多因子综合作用的结果,但是就某一具体地区而言存在重点尺度和主控因子,土壤侵蚀的重点尺度与主控因子的时空关系因时间、空间和尺度而异^[4,5]。近年来,景观尺度上土壤侵蚀的空间变异性以及与环境因子的关系研究已成为国际上的研究热点之一^[6~9]。在侵蚀严重的黄土丘陵沟壑区,这方面的研究尤为重要^[10~12]。

近年来,空间分布式土壤侵蚀过程模型取得了长足的发展^[13]。这不仅有助于深入理解土壤侵蚀过程,而且还可用于模拟土地利用变化的水土流失效应^[14]。这些土壤侵蚀模型虽然对未来降雨事件的水土流失预报不尽人意,但是对不同土地利用方案在同一次降雨事件中的土壤侵蚀量模拟却卓有成效^[15]。

土壤侵蚀模型 LISEM(Limburg Soil Erosion Model)是荷兰 Utrecht 大学的研究人员,在荷兰南部 Limburg 省黄土区研究基础上开发的分布式土壤侵蚀过程模型。该模型不仅考虑了土壤侵蚀发生的主要过程,而且考虑了降雨、前期土壤含水量、土地利用/覆盖类型、地貌特征、土壤特征、植物特征、地表特征和道路等属性的时空变异,以文本和图表等多种方式输出小流域尺度上的水文和侵蚀的时空指标^[16]。

傅伯杰等采用 LISEM 模型模拟了黄土丘陵区大南沟小流域 5 种土地利用格局变化对流域出口水土流失的影响^[17]。本文也采用 LISEM 模型模拟大南沟小流域 5 种土地利用格局下每个像元土壤侵蚀量的空间分布,分析立地尺度上土壤侵蚀量的时空变异性概况,研究土壤侵蚀与降雨、土地利用和地形等环境因子的相关性,旨在探讨降雨、土地利用和地形对土壤侵蚀空间分布的影响。

1 研究区域自然概况

试验区位于陕西安塞县大南沟小流域(东经 109°16'~109°18',北纬 36°52'~36°54'),面积 3.5km²。年平均降水量 549mm,其中 60%集中在 7~9 月份。地貌类型为典型的黄土丘陵沟壑地貌,地形破碎,沟壑纵横。土壤类型为黄土母质上发育而成的黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重。流域内自然植被破坏殆尽,垦殖指数较高,土地利用以耕地、休闲地、荒草地、间作地、果园、林地和灌木地为主^[10,17~19]。

2 研究方法

2.1 土地利用方案

以 1975 年土地利用的航片解译图(LU75)、1998 年现状调查图(LU98)、25°退耕(FA25)、20°退耕(FA20)和 15°退耕(FA15)3 种土地利用规划图共 5 个土地利用图组成了大南沟小流域土地利用格局从过去、现在到将来的时间变化系列^[17,18]。

分析表明,这 5 种土地利用格局还代表了陡坡农用地(耕地和休闲地)逐步退耕的过程。从 1975 年、1998 年到 25°退耕,陡坡耕地和休闲地逐步退耕为林地/灌木地,同时在缓坡荒地上植树种草;在土地利用规划的 3 种退耕格局中,20°和 15°以上的陡坡耕地和休闲地逐步转变为果园/经济林地^[17,18]。

2.2 模型模拟

通过 3a 的实地观测(包括土壤特征、植物特征、土地利用、降雨过程、产流产沙过程等),以 1998 年 8 月 1 日所观测到暴雨产流产沙过程为基础,对 LISEM 模型进行校正^[10]。然后采用校正后的模型,模拟在 1998 年 8 月 1 日暴雨过程,5 种土地利用方案下每个像元土壤侵蚀量的空间分布(像元数为 35242 个)。

其中降雨量是以流域里安装的 5 个自动雨量计的观测数据为基础,在 GIS 平台上(PCRaster 2.0)获得 1998 年 8 月 1 日暴雨过程中,整个小流域降雨量的空间分布图^[10]。

2.3 数据获取

对 LISEM 模型生成的小流域土壤侵蚀量(t/hm^2)的空间分布图(图 1~图 3)、5 种土地利用图以及 DEM 图,在 GIS 平台上(PCRaster 2.0)获得每个像元的土壤侵蚀量(t/hm^2)、土地利用类型以及地形指数(包括坡向、坡度、相对海拔、垂直凹凸度和水平凹凸度)。

2.4 统计分析方法与数据预处理

采用汇总统计法分析土壤侵蚀的基本概况,采用相关分析法研究土壤侵蚀与降雨量、土地利用类型和地形指数的相关性。

在相关分析之前,先对定性变量,进行 0/1 赋值,转化为多个量化的亚变量^[18~20]。土地利用有 5 种类型(林地/灌木地,果园/经济林地,荒草地,休闲地和耕地),可以分解为相应的 5 个亚变量,均表示为 0(不存在)和 1(存在)。例如,如果某个像元为林地,则林地亚变量赋 1,剩余 4 个亚量均赋 0。

对坡向(朝北为起点顺时针旋转角度)经过正弦和余弦,转化为 2 个东西向和南北向 2 个亚变量,分别表示朝东和朝北的程度^[18~20]。相对海拔表示为实际海拔与流域出口海拔(1805m)的差异。凹凸度为正值表示凸坡,负值表示凹坡。

3 研究结果与分析

3.1 土壤侵蚀时空变异性概况

表 1 为不同土地利用格局下土壤侵蚀的空间变异性概况(图 1~图 3)。可见,在 1998 年 8 月 1 日暴雨过程之中,最小土壤侵蚀量为 $0.0153t/hm^2$,最大侵蚀量为 $1861t/hm^2$,空间变异系数均超过 200%。

对 5 种土地利用方案土壤侵蚀强度的比较分析,可以揭示土壤侵蚀强度随着治理程度(即土地利用格局优化)加强而呈现出的时间变化规律(图 1~图 3)。由表 1 可见,平均土壤侵蚀量为 $24.27\sim 38.42t/hm^2$ 之间,不同土地利用格局之间存在显著差异。相对来说,以 1975 年全流域各像元的平均土壤侵蚀量最大($38.42t/hm^2$)(图 1),1998 年次之($36.39t/hm^2$)(图 2),3 种退耕格局最小($24.27\sim 24.80t/hm^2$)(图 3)。其中,3 种退耕格局之间的差异不明显。

表 1 不同土地利用格局下土壤侵蚀(t/hm^2)的时空变异性

Table 1 Spatial variation in soil erosion based on different landuse patterns

土地利用方案 Land use scenario	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Stand deviation	变异系数(%) Coefficient of variation	样本数 Sample number
LU75	38.42A*	0.0322	1854	82.65	215.1	35242
LU98	36.39B	0.0153	1861	81.98	225.3	35242
FA25	24.27C	0.0259	1582	73.18	301.5	35242
FA20	24.52C	0.0259	1583	73.2	298.5	35242
FA15	24.8C	0.0259	1590	73.54	296.5	35242

* 表中字母表示差异显著性检验结果,若两两之间有一个字母相同,表示差异不显著($p=95\%$) Numbers in a column followed by same letters are not significantly different at the 95% level of probability by t test

这表明,随着陡坡农地逐渐退耕还林还草,土地利用日趋合理,立地尺度上的土壤侵蚀也相应地逐步降低^[21]。

因为变异系数消除了量纲的影响,所以能用于不同土地利用格局之间的比较。从表 1 的空间变异系数来看,不同土地利用格局下,土壤侵蚀量空间变异系数也存在显著差异。相对来说,1975 年土地利用格局下土壤侵蚀的空间变异系数最小(215.1%),1998 年土地利用格局次之(225.3%),3 种退耕格局最大(296.5%~301.5%)。其中 3 种退耕格局之间的差异不明显。

可见,因地制宜地调整土地利用格局(按坡度退耕),提高了景观多样性,分散了土壤侵蚀危险,避免了高强度土壤侵蚀大面积集中分布所引发的更高强度更大面积侵蚀的链动后果^[22]。

3.2 降雨对土壤侵蚀空间分布的影响

从表 2 可见,土壤侵蚀强度与雨强和雨量都为显著的正相关,表明土壤侵蚀强度随着雨强加剧和雨量增大而呈线性增大趋势。合理的土地利用格局可以显著地削弱土壤侵蚀强度与降雨参数的这种正相关性。对不同土地利用格局来说,土壤侵蚀强度与降雨参数的相关性大小顺序为:LU75>LU98>退耕格局,3 种退耕格局之间的差异不明显。

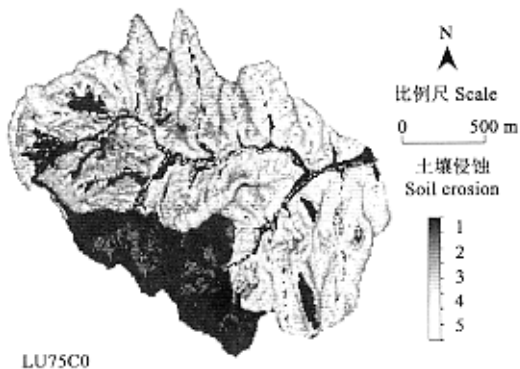


图 1 1975 年土地利用格局的土壤侵蚀强度空间分布模拟图
Fig. 1 Spatial distribution of predicted soil erosion intensity based on land use pattern in 1975

土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity: 1 极轻 Negligible; 2 轻度 Slight; 3 中度 Moderate; 4 重度 Serious; 5 极重 Severe

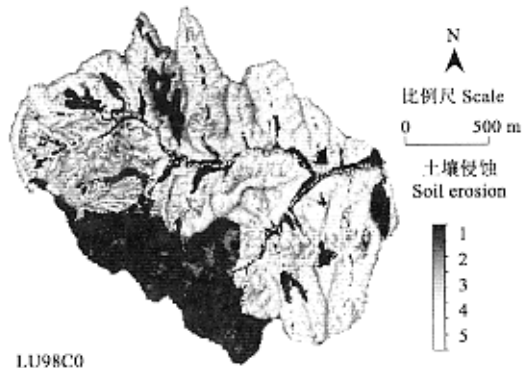


图 2 1998 年土地利用格局的土壤侵蚀强度空间分布模拟图
Fig. 2 Spatial distribution of predicted soil erosion intensity based on land use pattern in 1998

土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity: 1 极轻 Negligible; 2 轻度 Slight; 3 中度 Moderate; 4 重度 Serious; 5 极重 Severe

1975 年分布有大量的陡坡耕地^[18],地表覆盖度比较小,降雨截留少,直接打击疏松地表,不仅引起严重的溅蚀,而且形成结皮,降低入渗,进一步加剧土壤面蚀和沟蚀,所以降雨为土壤侵蚀的主控因子^[24]。1998 年的陡坡耕地面积减少,相反林地/灌木地增加^[18],植被的减流减沙作用明显(表 3 和表 4),降雨的影响相对减弱^[25]。就 3 种退耕格局而言,随着陡坡农地进一步退耕还林还草,土地利用日趋合理,植被盖度增加,降雨对土壤侵蚀强度的影响也相应地进一步减弱^[23,26]。

3.3 土地利用类型间的差异

不同土地利用格局之间各种土地利用类型的平均土壤侵蚀强度的比较分析(表 3),可以揭示出各种土地利用类型侵蚀强度的动态变化。从 1975 年、1998 年到 25°退耕方案,土地利用日趋合理,林地/灌木地、果园/经济林地、农地和休闲地的平均土壤侵蚀强度都在逐渐降低;荒草地却是先增大后降低。从 25°、20°到 15°退耕,各种土地利用类型的土壤侵蚀强度都没有明显的变化。

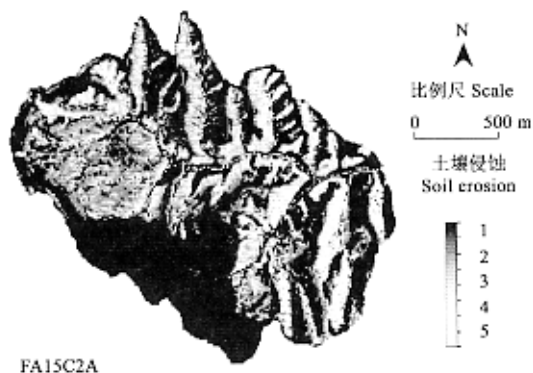


图 3 15°退耕格局的土壤侵蚀强度空间分布模拟图
Fig. 3 Spatial distribution of predicted soil erosion intensity based on land use pattern of 15-degree cropland limit

土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity: 1 极轻 Negligible; 2 轻度 Slight; 3 中度 Moderate; 4 重度 Serious; 5 极重 Severe

表 2 不同土地利用格局下土壤侵蚀量与降雨的相关性分析

Table 2 Correlation between the soil erosion and the rainfall based on different land use patterns

土地利用格局 Land use pattern	LU75	LU98	FA25	FA20	FA15
雨强 Rainfall intensity (mm/h)	0.2189**	0.1993**	0.1501**	0.1512**	0.1517**
雨量 Precipitation (mm)	0.2413**	0.2364**	0.158**	0.1589**	0.1598**

* 表示显著水平为 0.05 Denote the significance at the level of 95%; ** 表示显著水平为 0.01 * and * * * and 99% of probability that differences exist within a row as determined by analysis of variance respectively

表 4 是土壤侵蚀与量化的 5 种土地利用类型之间的相关性分析,正值表示该土地利用类型的土壤侵蚀大于其它类型,负值则正相反,绝对值越大,表示差异越显著^[17~20]。从表 3 可见,土壤侵蚀量在不同土地利用类型之间都存在显著差异^[17~20]。

通过土壤侵蚀强度与土地利用类型的相关分析(表 4),可以反映土地利用类型之间土壤侵蚀强度的相对大小。对这 5 种土地利用方案来讲,林地/灌木地和土壤侵蚀强度的相关性皆为负,表明林地/灌木地比其它类型的土壤侵蚀强度相对小;1975 年和 1998 年农地的土壤侵蚀强度也相对比较小;荒草地与土壤侵蚀强度之间则均为正相关,表明荒草地上的土壤侵蚀强度比其

它类型相对严重;果园、休闲地和农地与土壤侵蚀强度的相关性一般较弱,表明这些土地利用类型的土壤侵蚀强度居中。

林地/灌木地上植被盖度比较大,不仅能截留降雨减少径流,而且能削弱雨滴对土表的直接打击造成的溅蚀;林地/灌木地的土壤表面存在较多的枯枝落叶及其分解的腐植质,也可以削弱雨滴的溅蚀,土表不易结皮,不仅能增加入渗、减少径流,而且还能降低片流侵蚀、减弱径流的挟沙能力,从而有效地控制泥沙搬运能力并促进泥沙的沉积^[21, 22]。

表 3 不同土地利用格局各种土地利用类型的平均土壤侵蚀强度(t/hm^2)

Table 3 Mean soil erosion intensity (t/hm^2) of land use types for different land use patterns

土地利用格局 Land use pattern	林地/灌木地 woodland/shrub land	果园/经济林 Orchard/cash-woodland	荒草地 Wasteland	休闲地 Fallow land	农地 Cropland	平均 Mean
LU75	5.72	44.89	52.41		29.26	38.42
LU98	4.41	32.84	58.74	28.05	24.33	36.39
FA25	1.41		49.97	23.59	22.53	24.27
FA20	1.41	23.03	49.91	29.87	22.82	24.52
FA15	1.43	24.23	50.21	23.03	25.37	24.80

表 4 不同土地利用格局下土壤侵蚀强度与土地利用类型的相关分析

Table 4 Correlation between the soil erosion intensity (t/hm^2) and land use types for different land use patterns

土地利用格局 Land use pattern	林地/灌木地 woodland/shrub land	果园/经济林 Orchard/cash-woodland	荒草地 Wasteland	休闲地 Fallow land	农地 Cropland
LU75	-0.1184	0.0082	0.1600		-0.0973
LU98	-0.1532	-0.0068	0.2291	-0.0284	-0.1092
FA25	-0.2456		0.2607	-0.0022	-0.0122
FA20	-0.2263	-0.0290	0.2692	0.0057	-0.0339
FA15	-0.2504	-0.0036	0.2568	-0.0030	0.0021

荒草地上水土流失严重的原因,一方面是植物盖度比较小,植被的减流减沙效应不明显;另一方面是荒草地上的降雨量和降雨强度都相对比其它类型大;再一方面是荒草地分布海拔相对较低、坡度比较大^[18],所以土壤侵蚀比较严重。

因为 1975 年和 1998 年农地上的降雨量和降雨强度比较小,所以其土壤侵蚀强度也相对比较低。

3.4 地形分异

相关分析(表 5)表明,水平凹凸度和相对海拔对土壤侵蚀空间分布的影响比较显著,坡向、坡度和垂直凹凸度的影响较小。土壤侵蚀强度与水平凹凸度为正相关,说明土壤侵蚀强度以水平凸坡大于水平凹坡^[26]。这可能是因为土地利用的坡形分布格局所造成的。在 3 种退耕格局中,侵蚀强度比较大的荒草地多分布在凸坡,而侵蚀强度比较低的林地/灌木地多分布在凹坡^[18]。

表 5 不同土地利用格局下土壤侵蚀强度与地形指数的相关分析

Table 5 Correlation between the soil erosion intensity (t/hm^2) and terrain indices for different land use patterns

土地利用格局 Land use pattern	Sin(坡向) Sin(aspect)	Cos(坡向) Cos(aspect)	坡度(度) Slope (degree)	相对海拔(m) Relative elevation	垂直凹凸度 Profile curvature	水平凹凸度 Plan curvature
LU75	-0.0277	-0.0343	0.0574	-0.1851	-0.0329	0.2696
LU98	-0.0185	-0.0279	0.0392	-0.1559	-0.0371	0.2603
FA25	0.1337	-0.0490	-0.0372	-0.1911	-0.0705	0.2389
FA20	0.1196	-0.0484	-0.0205	-0.1912	-0.0774	0.2327
FA15	0.1351	-0.0486	-0.0398	-0.1898	-0.0691	0.2387

土壤侵蚀强度受到梁峁沟壑地形垂直分异因素的影响,随着海拔的降低而显著增大。这一方面与降雨的海拔分布格局有关,1998 年 8 月 1 日暴雨的强度和总量都随着海拔降低而增大;另一方面,随着海拔降低,因为受到上坡来水来沙的影响,土壤侵蚀强度逐渐增大^[26];再一方面,因为侵蚀强度比较大的荒草地多分布在低海拔的沟缘线以下陡坡处,而侵蚀强度比较小的林地/灌木地的分布海拔较高^[18](表 3)。

土壤侵蚀强度与垂直凹凸度均为负相关,即土壤侵蚀强度以垂直凹坡略大于垂直凸坡。这与降雨、其它地形指数和土地利用有关^[26]。垂直凹坡的降雨强度和总量略大于凸坡;垂直凹坡多分布在低海拔沟缘线以下陡坡处,而垂直凸坡多分布在较高海拔的平缓处^[18];侵蚀严重的荒草地多分布在垂直凹坡,而侵蚀强度较轻的林地/灌木地则多分布在垂直凸坡上^[18](表 3)。

土壤侵蚀强度与 Cos(坡向)均为负相关,偏南坡的土壤侵蚀强度大于偏北坡。这也是由降雨和土地利用的影响所造成的。降雨强度以偏南坡大于偏北坡;侵蚀严重的荒草地多分布在偏南坡,侵蚀强度较轻的林地/灌木地则多分布在偏北坡^[18](表 3)。

土壤侵蚀强度与 Sin(坡向)的相关性在 1975 年和 1998 年为负相关(表示偏西坡的侵蚀强度大于偏东坡),而在 3 种退耕方案中为正相关(表示偏西坡小于偏东坡)。这主要与降雨和土地利用的坡向分布格局的变化有关。1998 年 8 月 1 日降雨的强度和总量都以偏西坡大于偏东坡;再加上 1975 年侵蚀严重的荒草地多分布在偏西坡,1975 年和 1998 年侵蚀较轻的林地/灌木地

则多分布在偏东坡。所以 1975 年和 1998 年土壤侵蚀强度以偏西坡大于偏东坡。在 3 种退耕格局中, 植被覆盖和土地利用方式成为土壤侵蚀的主控因子^[23]; 侵蚀严重的荒草地大多分布在偏东坡, 而侵蚀强度较轻的林地/灌木地大多分布在偏西坡^[18](表 3), 所以土壤侵蚀强度以偏东坡大于偏西坡。

土壤侵蚀强度和坡度的相关性在 1975 年和 1998 年为正相关, 而在 3 种退耕格局中为负相关。这是因为坡度是土壤侵蚀的直接影响因子之一, 一般说来, 坡度越大, 土壤侵蚀越严重^[27]; 另一方面, 1998 年 8 月 1 日的雨强和雨量也与坡度存在一定的正相关性。可是, 在 3 种退耕格局中, 陡坡农地退耕为林地/灌木地, 植物覆盖对土壤侵蚀强度的影响增大, 坡度的影响相对降低; 另一方面, 侵蚀程度较轻的林地/灌木地的分布坡度显著增大^[18](表 3), 造成土壤侵蚀强度随坡度的增大反而呈现减弱的趋势。

4 结论与讨论

(1) 土壤侵蚀时空变异性概况 对大南沟小流域不同土地利用格局来说, 立地尺度上平均土壤侵蚀强度以 1975 年 > 1998 年 > 退耕格局, 其中 3 种退耕格局之间的差异不明显。这表明, 陡坡农地退耕还林还草, 能有效地降低立地尺度上的土壤侵蚀强度。

整个流域地形破碎, 各种土地利用方案下土壤侵蚀强度的空间变异都很显著。对不同土地利用格局而言, 土壤侵蚀强度空间变异系数与土地利用本身的空间变异性一致, 表现为 1975 年 < 1998 年 < 退耕格局, 3 种退耕格局之间的差异不明显。这表明, 优化土地利用格局(按坡度退耕), 会进一步地提高土壤侵蚀的空间变异性, 从而在空间上分散土壤侵蚀危险, 防止高强度土壤侵蚀大面积集中分布所引起的水土流失加剧。

(2) 降雨对土壤侵蚀空间分布的影响 降雨是影响侵蚀的主要动力因素之一, 降雨直接打击土表引起溅蚀, 而且还通过对入渗、结皮、径流、细沟发育的影响从而对面蚀和沟蚀带来间接影响^[21, 24, 25]。黄土丘陵小流域的暴雨存在强烈的时空分布不均特征, 决定了流域侵蚀强度的时空变异性^[24]。研究发现, 土壤侵蚀强度随着雨强加剧和雨量增大而呈线性增大趋势, 但是合理的土地利用格局可以有效地减小降雨和土壤侵蚀强度的相关性。对不同土地利用格局来说, 相关性大小顺序为 LU75 > LU98 > 退耕格局, 3 种退耕格局之间没有显著差异。

(3) 土地利用类型对土壤侵蚀时空变异的影响 土地利用改变了下垫面状况, 不仅影响降雨截留、入渗、径流, 而且还对沟坡地上的面蚀和沟蚀以及沟谷地的沟蚀都有着直接影响。小流域土地利用空间分布格局的变化, 必然导致土壤侵蚀空间格局的变化。适宜的土地利用格局, 可起到拦蓄降水、促进入渗、减少径流、控制泥沙的作用, 相反不合理的土地利用却会加剧水土流失^[17, 18, 28]。

不同土地利用格局平均土壤侵蚀强度的比较表明, 从 1975 年、1998 年到 25°退耕, 陡坡农地退耕还林还草, 植被覆盖度增加, 林地/灌木地、果园/经济林地、农地和休闲地的平均土壤侵蚀强度都逐渐降低, 荒草地先增大后降低; 对 3 种退耕格局来说, 各种土地利用类型的土壤侵蚀强度都没有明显的变化。土壤侵蚀强度和土地利用的相关分析表明, 林地/灌木地上土壤侵蚀强度最小, 荒草地相对最严重; 果园、休闲地和农地居中; 1975 年和 1998 年农地上的降雨少, 因而土壤侵蚀强度也相对较低。

(4) 地形对土壤侵蚀时空变异的影响 地形通过影响降雨重分布、下垫面性质、侵蚀动力, 从而给侵蚀带来重要影响。黄土丘陵区沟壑纵横, 破碎的地形更是该区土壤侵蚀的重要影响因子之一。

研究发现, 水平凹凸度和相对海拔对土壤侵蚀空间分布的影响比较显著, 而坡向、坡度和垂直凹凸度的影响较小。对所有这 5 种土地利用格局而, 土壤侵蚀强度都以水平凸坡大于水平凹坡、垂直凹坡略大于垂直凸坡、偏南坡大于偏北坡、低海拔大于高海拔。对 1975 年和 1998 年土地利用格局来说, 土壤侵蚀强度以偏西坡大于偏东坡、陡坡大于缓坡; 对 3 种退耕格局而言则正相反。可见, 合理的土地利用格局可以有效地削弱甚至逆转地形对土壤侵蚀强度的影响。

References:

- [1] Leng S Y, Li X B. New progresses of international study on land quality indictors (LQIs). *Acta Geographica Sinica*, 1999, **54**(1): 177~185.
- [2] Qiu Y, Fu B J. Land evaluation for sustainable use based on landscape ecologic theory. *Resources Science*, 2000, **22**(6): 1~8.
- [3] Hartemink A E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma*, 1998, **85**: 283~306.
- [4] Qiu Y, Zhang J T, Zheng F Y. The kernel of landscape ecology: spatial and temporal heterogeneity in ecological systems. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, **19**(2): 42~49.
- [5] Qiu Y, Fu B J, Wang Y. Spatiotemporal Variation in Soil Erosion and its Relation to the Environmental Factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(1): 108~111.
- [6] Fahnestock P, Lal R, Hall G F. Land use and erosional effects on two Ohio Alfisols. I. Soil properties. *J. Sustain. Agric.*, 1996, **7**: 63~84.
- [7] Bolinder M A, Angers D A, Gregorich, E G, et al. The response of soil quality indictors to conservation management. *Can. J. Soil*

Sci., 1999, **79**: 37~45.

- [8] Cihacek L J, Swan J B. Effects of erosion on soil chemical properties in the north central region of the United States. *J. Soil Water Conserv.*, 1994, **49**: 259~265.
- [9] Qiu Y, Fu B J. Spatial variation and scale variation in soil and water loss in heterogeneous landscape: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(2): 330~337.
- [10] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Variability of the soil physics properties on the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(5): 587~594.
- [11] Fu B J. The spatial pattern analysis of agricultural landscape in the Loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(2): 113~120.
- [12] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the Regional Environment in the Yanjuan Gou Catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, **54**(3): 241~246.
- [13] Laflen J M, Lwonard J L, Foster G R. WEPP a new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil Water Conservation*, 1991, **46**(1): 34~38.
- [14] Karvonen T, Koivusalo H, Jauhainen M, *et al.* A hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *Journal of Hydrology*, 1999, **217**(3-4): 253~265.
- [15] Hessel R, Jetten V, Liu B Y, *et al.* Calibration of the Lisem model for a small Loess Plateau catchment. *Catena*, 2003, **54**(1-2).
- [16] De Roo A P J, Wesseling C G, Jetten V G, *et al.* LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainages basins I. Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 1996, **10**: 1107~1117.
- [17] Fu B J, Qiu Y, Wang J, *et al.* Effect Simulations of Land Use Change on the Runoff and Erosion for a Gully catchment of the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(6): 717~722.
- [18] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatio-temporal distribution of land use in relation to topography in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(1): 20~29.
- [19] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 741~747.
- [20] Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, *et al.* Soil attribute predictions using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**: 443~452.
- [21] Rai S C, Sharma E. Comparative assessment of runoff characteristics under different land use patterns within a Himalayan watershed. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 2235~2248.
- [22] Ludwig J A, Tongway D J, Marsden S G. Stripes, strands or stipples: modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. *Catena*, 1999, **37**: 257~273.
- [23] Hill R D, Peart M R. Land use, runoff, erosion and their control: a review for southern China. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 2029~2042.
- [24] Wang W Z, Jiao J Y. Statistic analysis on variation of rainfall and runoff-sediment yield process on slope surface in Loess Plateau region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1986, **15**(5): 21~28.
- [25] Xu F, Cai Q G, Wu S A, *et al.* Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopland. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, **5**(2): 23~29.
- [26] Kreznor W R, Olson K R, Banwart W L, *et al.* Soil, landscape, and erosion relationships in a northwest Illinois watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 1763~1771.
- [27] Wang B Q, Liu G B. Effects of relief on soil nutrient losses in sloping fields in hilly region of Loess Plateau. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, **5**(2): 18~22.
- [28] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shannxi, China. *Catena*, 2000, **39**(1): 69~78.

参考文献:

- [1] 冷疏影, 李秀彬. 土地质量指标体系国际研究的新进展. *地理学报*, 1999, **54**(1): 177~185.
- [2] 邱扬, 傅伯杰. 土地持续利用评价的景观生态学基础. *资源科学*, 2002, **22**(6): 1~8.
- [4] 邱扬, 张金屯, 郑凤英. 景观生态学的核心: 生态学系统的时空异质性. *生态学杂志*, 2000, **19**(2): 42~49.
- [5] 邱扬, 傅伯杰, 王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系. *水土保持学报*, 2002, **16**(1): 108~111.
- [9] 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异. *生态学报*, 2004, **24**(2): 330~337.
- [10] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. *地理学报*, 2002, **57**(5): 587~594.
- [11] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析. *生态学报*, 1995, **15**(2): 113~120.
- [12] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵小流域土地利用变化对生态环境的影响-以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, 1999, **54**(3): 241~246.
- [17] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, **56**(6): 717~722.
- [18] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用的时空分布及其与地形因子的关系. *自然资源学报*. 2003, **18**(1): 20~29.
- [19] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析. *生态学报*, 2000, **20**(5): 741~747.
- [24] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析. *水土保持通报*, 1986, **15**(5): 21~28.
- [25] 许峰, 王开敏, 傅安, 等. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **5**(2): 23~29.
- [27] 王百群, 刘国彬. 黄土丘陵地形对坡地土壤养分流失的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **5**(2): 18~22.