

退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响 ——以陕西省安塞县为例

周德成, 赵淑清*, 朱超

(北京大学 a. 城市与环境学院, b. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 退耕还林工程(Sloping land conversion program, SLCP)可快速改变土地利用/覆被格局。论文以黄土高原典型沟壑区——陕西省安塞县为例,利用 MSS/TM/ETM + 卫星遥感影像,获取研究区6个时期土地利用/覆被的时空信息,通过统计模型,定量分析了研究区SLCP对土地利用/覆被格局的影响。草地、耕地及林地为主要土地利用/覆被类型,研究区土地利用/覆被变化整体处于不平衡态势;整个研究时段内,耕地先增后减,整体减少38.4%;林地先减后增,整体增加4.36%;灌木林地和草地减少,而未成林造林地快速增加;SLCP显著加强了耕地的递减趋势,并大幅增加了未成林造林地面积,至2010年未成林造林地面积显著大于天然林地的面积。这些变化可能具有降低土壤侵蚀与产流量、改善土壤结构、增加土壤碳吸收等效应;SLCP能提高农民收入,且大部分农民支持SLCP;但其负面效应亦不可忽视。研究将有助于对SLCP效应的全面理解,并可为该区生态恢复工程的规划与决策及生态环境保护提供参考。

关键词: 黄土高原;退耕还林工程;土地利用/覆被变化;安塞县

中图分类号: F301.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)11-1866-13

由于人口压力、经济增长及长期的土地开发,中国大量原始森林及湿地被消耗,大部分草地和耕地退化^[1-2]。这种对生态系统的干扰将导致严重的沙漠化、洪灾、土壤侵蚀、温室气体增加以及野生动植物栖居地的破坏^[3]。为了降低土壤侵蚀、荒漠化及增加森林覆盖率,中国采取了多种生态恢复工程,包括退耕还林工程(Sloping land conversion program, SLCP)、天然林保护工程等,其中SLCP为发展中国家最大的土地休耕/再造林地计划^[1,4];1990—2010年,中国为世界造林面积最大的国家^[5]。这些生态恢复工程将导致大尺度、转换性的变化并将在地区和国家尺度产生深远的环境及社会经济影响^[6]。土地利用/覆被变化(Land use / cover change, LUCC)是生态恢复工程最直接的后果,LUCC进而会对生态系统、全球生物地球化学和气候变化及人类可持续发展产生重要影响^[7]。忽略土地利用/覆被的快速变化信息可能无法正确评价区域的生态环境效应,如可能极大地高估(或低估)生态系统碳吸收的能力^[8]。

黄土高原是我国生态环境最脆弱的地区之一,水土流失是该区域生态环境恶化的主要原因^[9]。严重的水土流失不仅引起土壤退化、土地资源破坏,而且由此产生的大量泥

收稿日期: 2011-03-28; 修订日期: 2011-06-07。

基金项目: 国家自然科学基金(41071050); 科技部气候变化研究国家重大科学研究计划(2010CB50600)。

第一作者简介: 周德成(1983-),男,湖北神农架人,博士研究生,主要研究土地变化及其生态后果。E-mail: zhoude@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: sqzhao@urban.pku.edu.cn

沙还会淤塞江河湖泊,抬高下游河床,加剧洪水灾害^[10]。人类不合理的土地利用方式是黄土高原土壤侵蚀加剧、生态环境恶性循环的主要原因,黄土塬区的人为加速侵蚀量占总侵蚀量的 80% 左右^[11],而陡坡开垦正是土地利用不合理的具体表现。陡坡开垦不仅引起水土流失,而且可破坏土壤结构,尤其降低土壤有机质含量。例如,1954—1998 年,黄土高原坡耕地净土壤有机碳损失为 $0.24 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[12]。要治理坡耕地的水土流失,必须对黄土高原现有土地利用结构进行调整,而 SLCP 就是土地利用结构调整的具体措施^[13],必然导致其土地利用/覆被发生快速变化。安塞县地处黄土高原典型沟壑区,为全国最早实施 SLCP 的示范县之一,自 1999 年 SLCP 开始实施以来,在改善生态环境和减少水土流失方面取得了显著成效^[13-15]。本文以陕西省安塞县为例,利用卫星遥感数据,将最大似然监督分类与目视解译相结合,提取土地利用信息;在地理信息系统(GIS)支持下,定量评估研究区 1978—2010 年间快速的 LUCC 过程,并探讨其后果,旨在分析 SLCP 对黄土高原沟壑区 LUCC 过程的影响,为该区生态恢复工程的规划与决策及生态环境保护提供参考。

1 研究区概况

安塞地处西北内陆黄土高原腹地($108^{\circ}5'44'' \sim 109^{\circ}26'18'' \text{ E}$, $36^{\circ}30'45'' \sim 37^{\circ}19'3'' \text{ N}$),属典型的黄土高原丘陵沟壑区,土地面积 $2\,940.9 \text{ km}^2$ (其中 90% 为坡地)。气候属中温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 $8.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 505.3 mm ,74% 集中在 6—9 月,主要自然灾害有:干旱、大风、冰雹、霜冻等,尤以干旱最为严重。研究区土壤土层深厚,质地组成以粉沙为主,缺乏有机质和粘粒物质,胶结能力差,遇水易分散崩解,抗蚀能力低。因此,境内水土流失严重,水土流失面积占土地总面积的比重约 97%,属于强度水土流失区。

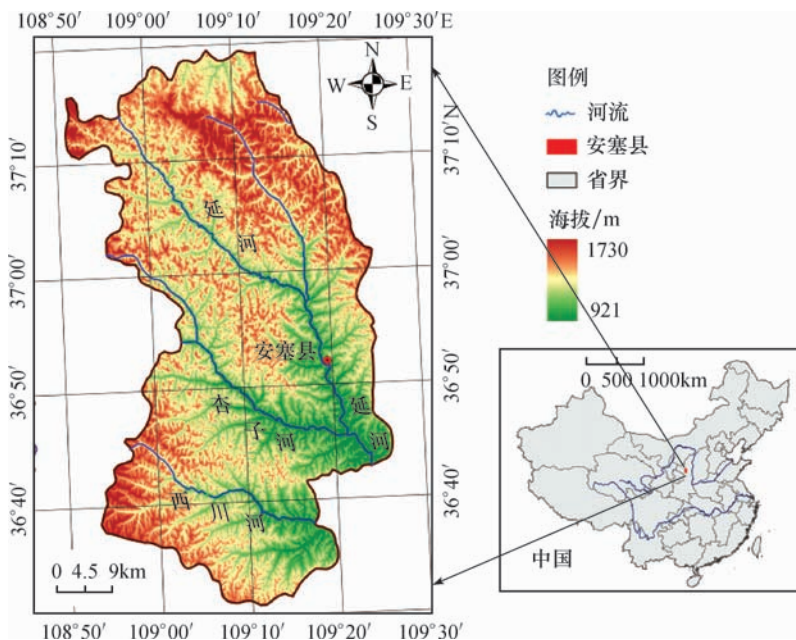


图1 研究区位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据收集与土地利用/覆被分类

基于遥感信息源的土地利用/覆被信息自动提取方法目前被广泛应用,而最大似然法是目前应用最普遍的监督分类方法^[16-19],这些分类方法不需要有关数据分布的先验假设,可以根据已知训练区提供的样本,通过选择特征参数作为决策规则,建立判别函数以对影像进行图像分类,具有融合多源地学数据的能力和较好的灵活性^[20-21]。然而,训练样本的质量比分类器的选择对分类精度的影响更大,在缺乏先验知识时训练样本质量受到影响,使土地变化遥感自动分类结果精度受限^[22]。解决这一问题有效的办法之一是根据专家知识对自动分类结果进行人工目视判读校正^[23]。

为了研究安塞县快速的土地利用/覆被变化,本文选用了较高空间分辨率的 Landsat 系列遥感数据,包括 MSS/TM/ETM + (表 1),以及 90 m × 90 m 的 SRTM DEM 数据(<http://glovis.usgs.gov/>)。

表 1 土地利用/覆被分类数据源

Table 1 Data sources for land use/cover classification

TM/ETM 轨道号/列	采集年份及时间					
	1978 年	1990 年	1995 年	1999 年	2006 年	2010 年
127/34	1978-08-01	1990-08-29	1995-05-07	1999-10-17	2006-09-10	2010-10-15
127/35		1992-07-17	1995-05-07	1999-09-15	2006-09-10	2010-09-13

结合研究区内的实际情况,对照影像上的地物特征,本研究将土地利用/覆被类型划分为:耕地、林地、灌木林地、未成林造林地、草地、建设用地、水域和河流滩地及裸地。耕地包括水田和旱地;林地包括有林地、疏林地和其他林地;未成林造林专指退耕还林地;水域包括河渠、湖泊、水库坑塘和沼泽;建设用地包括居民建设用地和工矿交通用地;河流滩地及裸地指目前还未利用的土地,主要包括河流滩地、裸岩和未利用的闲置地等。其中,由于缺乏大比例尺地形图和土地利用图等其他参考,且水域及河流滩地和裸地所占面积比例极小,仅依靠遥感影像较难正确区分。因此,本研究中水域、河流滩地及裸地面积波动较大,本文未对二者的变化过程进行分析,但不影响其他土地利用/覆被类型的划分及其变化过程分析。

为了反映研究区 1978—2010 年快速 LUCC 过程以及退耕还林前后 LUCC 过程的差异,本文选择 1978、1990、1995、1999、2006 和 2010 年 6 个时期为代表年份。在 ERDAS Imagine 9.2 支持下,对遥感影像进行投影变换、图像增强、裁剪、镶嵌、波段组合等处理。由于研究区地形相对复杂,为了减少坡地及阴影的影响,本文将直方图均衡化后的 NDVI 数据以及坡度与 TM/ETM + 2、3、4、5 和 7(MSS 2、3 和 4 波段)波段组合,按照上述土地分类系统,分别选择训练区,采用最大似然法监督分类,对错分的地区进行手工修改,得到安塞县 6 期土地利用/覆被空间分布图(图 2)。

分类结果可信度的度量,一般是将航空照片、生态专题图、更高分辨率的影像和实地调查数据与分类结果进行比较^[24],本文选用更高分辨率影像对分类结果进行精度检验。Google Earth[®]作为一款虚拟地球仪软件把近 1~6 a 的卫星影像、航空相片和 GIS 数据叠加在一个三维模型上,地表绝大部分的分辨率在 15 m 以上,个别地区配有实地拍摄照片,可以有效地对土地利用/覆被分类结果进行验证^[25]。首先将各时期土地利用/覆被图叠加,提取

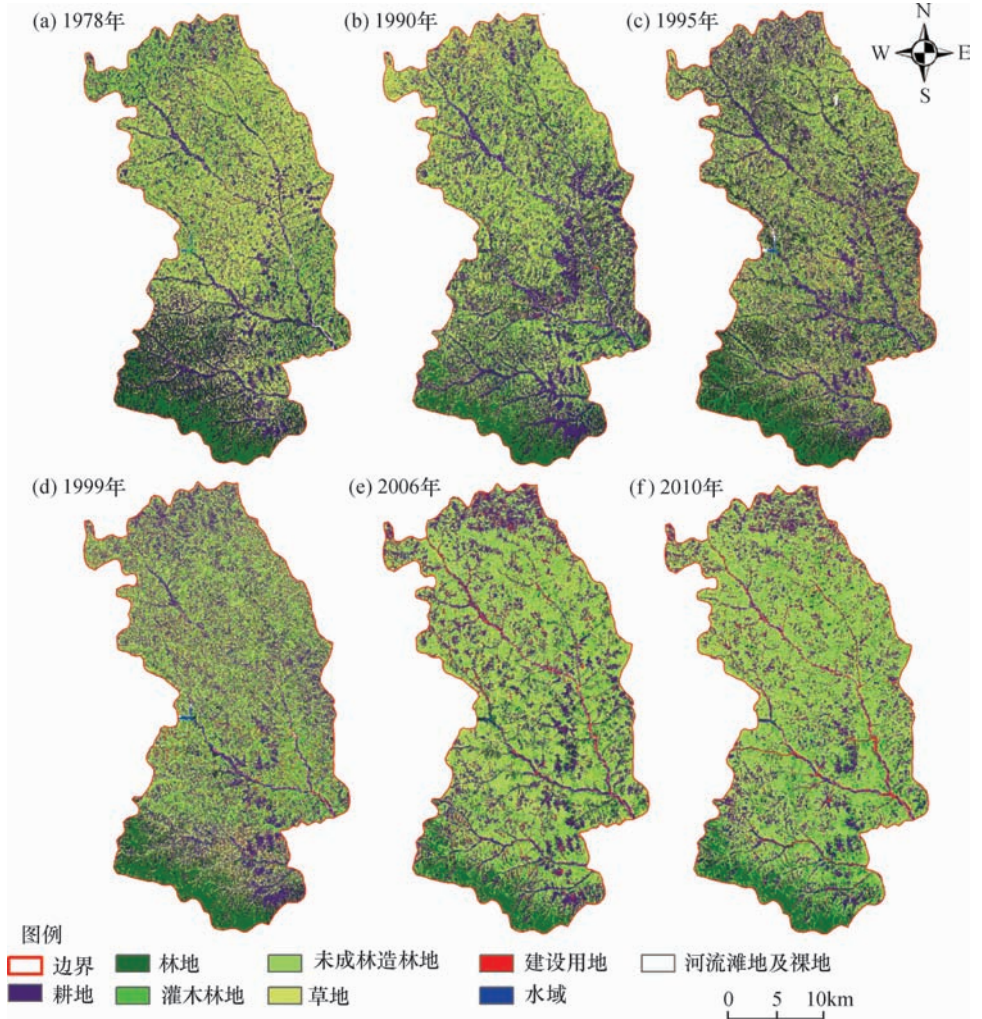


图2 安塞县 1978—2010 年土地利用/覆被空间分布

Fig. 2 Land use/cover pattern in Ansai County during 1978 - 2010

出未发生变化的区域,在此区域内随机产生 500 个样本点,与 Google Earth[®] 高分辨率卫星影像叠加,进行精度检验,解译精度为 87.6%,解译精度满足 LUCC 监测的要求^[26]。

2.2 土地利用/覆被变化过程

本文通过量化的要素或值如净变化、总变化、状态、方向、趋势以及净变化速度表征。某一土地类型的净变化指该土地类型一定时期内转入面积与转出面积之差,相应的总变化指转入面积与转出面积之和^[27];状态反映的是土地变化的动态,可分为平衡(指某土地类型转出的面积与转入面积相等)、准平衡(指转出与转入之间有稍微的差异)、不平衡(指土地类型面积转出与转入之间具有明显的差异)和极度不平衡四种状态;方向包括单向和双向转换两种;而趋势描述的是某土地类型变化的正负,如果为涨势(增加趋势)表示该土地类型在扩张,而落势(减少趋势)表示该土地类型在萎缩^[28];净变化速度则表征了某一土地类型的面积随时间变化的快慢。模型中主要指数的数学表达式:

$$N_c = [(U_b - U_a) / U_a] \times 100\% = [(\Delta U_{in} - \Delta U_{out}) / U_a] \times 100\% \quad (1)$$

$$T_c = [(\Delta U_{in} + \Delta U_{out}) / U_a] \times 100\% \quad (2)$$

$$P_s = N_c / T_c = (\Delta U_{in} - \Delta U_{out}) / (\Delta U_{in} + \Delta U_{out}) \quad (\Delta U_{in} + \Delta U_{out} \neq 0 \text{ 且 } -1 \leq P_s \leq 1) \quad (3)$$

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n |U_{bi} - U_{ai}|}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta U_{in-i} - \Delta U_{out-i}|}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{out-i} + \Delta U_{in-i})}{2 \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{out-i}}{\sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{in-i}}{\sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_t = \frac{S_a}{S_s} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta U_{out-i} - \Delta U_{in-i}|}{\sum_{i=1}^n (\Delta U_{out-i} + \Delta U_{in-i})}, \quad 0 \leq \frac{S_a}{S_s} \leq 1 \text{ 且 } 0 \leq P_t \leq 1, \quad S_s \neq 0 \quad (6)$$

$$R_s = \left(\sqrt{\frac{U_b}{U_a}} - 1 \right) \times 100\% = \left[\sqrt{\frac{U_a + (\Delta U_{in} - \Delta U_{out})}{U_a}} - 1 \right] \times 100\% \quad (7)$$

$$R_t = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{ai} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (|U_{bi} - U_{ai}|)}{\sum_{i=1}^n U_{ai}}} - 1 \right] \times 100\% \\ = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{ai} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (|\Delta U_{in-i} - \Delta U_{out-i}|)}{\sum_{i=1}^n U_{ai}}} - 1 \right] \times 100\% \quad (8)$$

式中: N_c 、 T_c 、 P_s 和 R_s 分别为单一 LUCC 类型的面积净变化、总变化、趋势与状态指数和净变化速度; S_a 、 S_s 、 P_t 和 R_t 分别为总体 LUCC 的面积净变化、总变化、趋势与状态指数和净变化速度; U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某一土地类型的面积; ΔU_{out} 为研究时段内某一土地类型转变为其他类型的面积之和; ΔU_{in} 为同时期其他类型转变为该类型的面积之和; U_{ai} 、 U_{bi} 分别为研究初期和末期第 i 种土地类型的面积; ΔU_{out-i} 为研究时段内第 i 种土地类型转变为其他类型的面积之和; ΔU_{in-i} 为其他类型转变为第 i 种类型的面积之和; n 为土地利用与土地覆被类型总数; T 为研究时段。模型中各参数的意义及其详细说明可参阅文献[27-29]。

3 结果

根据公式(1)~(8)对 6 期土地利用分类数据(图 2)分别进行空间分析和数理统计,得出了各时期土地利用/覆被分类面积以及 6 个时段(1978—1990、1990—1995、1995—1999、1999—2006、2006—2010 年和整个研究时段 1978—2010 年)各土地利用/覆被类型的面积变化、净变化、总变化、状态趋势指数以及净变化速度(表 2,表 3),并统计了各时期各土地利用/覆被类型的面积及面积百分比(图 3)。

表 2 陕西安塞县土地利用/覆被类型面积及变化

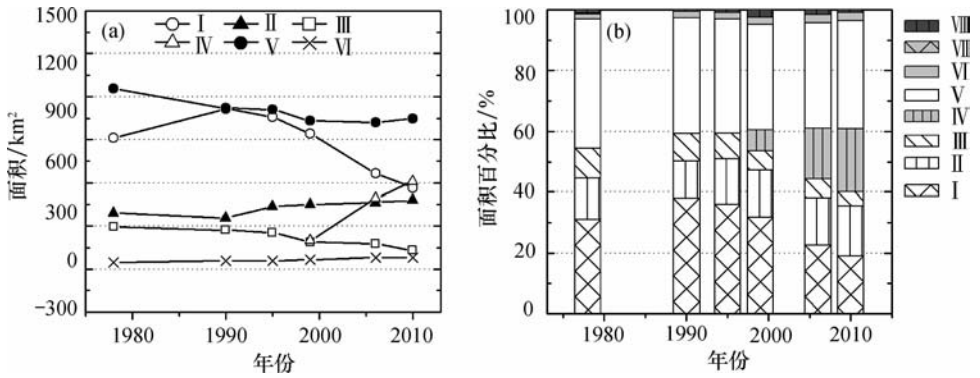
Table 2 Area of each land use/cover category in Ansai County and changes in land use/cover from 1960 to 2008

土地利用/覆被类型		耕地	林地	灌木林地	未成林造林地	草地	建设用地
面积/km ²	1978 年	915.19	391.49	293.75	-	1253.86	49.47
	1990 年	1112.21	358.46	271.82	-	1122.43	57.39
	1995 年	1060.95	436.19	253.87	-	1107.76	59.09
	1999 年	940.03	451.29	189.30	198.32	1028.43	65.85
	2006 年	664.43	461.42	174.66	493.92	1020.33	81.29
	2010 年	564.10	482.36	130.84	609.62	1049.34	81.83
1978—1990 年	面积变化/km ²	197.03	-33.03	-21.93	0.00	-131.42	7.92
	净变化/%	21.53	-8.44	-7.47	-	-10.48	16.01
	总变化/%	53.65	12.73	19.60	-	23.18	23.74
	趋势指数	0.40	-0.66	-0.38	-	-0.45	0.67
	净变化速度/%	1.64	-0.73	-0.64	-	-0.92	1.25
1990—1995 年	面积变化/km ²	-51.26	77.74	-17.95	-	-14.67	1.70
	净变化/%	-4.61	21.69	-6.60	-	-1.31	2.96
	总变化/%	20.76	49.18	16.75	-	12.82	6.29
	趋势指数	-0.22	0.44	-0.39	-	-0.10	0.47
	净变化速度/%	-0.94	4.00	-1.36	-	-0.26	0.59
1995—1999 年	面积变化/km ²	-120.92	15.09	-64.57	198.32	-79.33	6.76
	净变化/%	-11.40	3.46	-25.44	-	-7.16	11.44
	总变化/%	14.65	6.32	36.12	-	22.14	13.25
	趋势指数	-0.78	0.55	-0.70	-	-0.32	0.86
	净变化速度/%	-2.98	0.85	-7.07	-	-1.84	2.74
1999—2006 年	面积变化/km ²	-275.60	10.13	-14.64	295.60	1.89	5.44
	净变化/%	-29.32	2.25	-7.73	149.05	0.18	8.26
	总变化/%	33.15	3.19	12.58	181.70	2.80	11.56
	趋势指数	-0.88	0.70	-0.61	0.82	0.07	0.71
	净变化速度/%	-5.62	0.37	-1.33	16.43	0.03	1.33
2006—2010 年	面积变化/km ²	-100.33	20.94	-43.82	115.70	19.02	10.54
	净变化/%	-15.10	4.54	-25.09	23.43	1.85	14.79
	总变化/%	17.92	5.73	41.11	38.01	5.59	22.54
	趋势指数	-0.84	0.79	-0.61	0.62	0.33	0.66
	净变化速度/%	-4.01	1.12	-6.97	5.40	0.46	3.51
1978—2010 年	面积变化/km ²	-351.09	90.87	-162.91	609.62	-204.51	32.36
	净变化/%	-38.36	23.21	-55.46	-	-16.31	65.43
	总变化/%	61.28	68.88	109.18	-	100.95	95.89
	趋势指数	-0.63	0.34	-0.51	-	-0.16	0.68
	净变化速度/%	-1.50	0.65	-2.50	-	-0.55	1.59

表 3 安塞县土地利用/覆被综合状态与趋势指数及综合净变化速度

Table 3 Total status and trend index together with the total net change speed in Ansai County

时段	1978—1990 年	1990—1995 年	1995—1999 年	1999—2006 年	2006—2010 年	1978—2010 年
S_a /%	6.74	2.79	8.31	10.50	5.36	27.70
S_s /%	10.78	10.27	12.44	14.03	8.26	46.17
P_t	0.62	0.27	0.67	0.75	0.65	0.60
R_t /%	0.54	0.55	2.02	1.68	1.31	0.70



注: I 为耕地; II 为林地; III 为灌木林地; IV 为未成林造林地; V 为草地; VI 为建设用地; VII 为水域; VIII 为河流滩地及裸地。

图3 安塞县 1978—2010 年土地利用/覆被点线图 (a) 与面积百分比图 (b)

Fig. 3 (a) Lines and symbols of the land use/cover and (b) area percentage of each land use/cover type in Ansai County during 1978 - 2010

图 3(b) 表明研究区土地利用/覆被类型面积最大的为草地(均占 37.3%),其次为耕地(均占 29.8%),随后为林地(14.6%)和灌木林地(7.4%),其他三类土地合计不到总面积的 4%。1978—2010 年间,耕地先增后减、林地与草地先减后增,灌木林地处于减少态势而建设用地处于增加趋势,水域、河流滩地及裸地则处于波动趋势;SLCP 实施后,耕地大幅度减少而未成林造林地显著增加,林地面积缓慢增加,而草地面积趋于稳定(图 3)。

本文将 SLCP 实施前的 LUCC 过程划分为两个时段。1978—1990 年,耕地扩张面积最大,增加 197.03 km²,净变化 21.53%;草地减少面积最大,净减少 131.42 km²,其次为林地和灌木林地;林地与建设用地分别处于不平衡的减少和增加态势,以单向转换为主,其他地类均处于相对平衡态势,双向转换较频繁。此时段内,耕地主要转向草地,其次为灌木林地与林地,分别占转出总面积的 75.41%、11.63% 和 11.37%;林地及灌木林地主要转向耕地和草地,均占转出总面积的 80% 以上;草地主要转向耕地(64.95%)、灌木林地(22.70%)和林地(10.49%)。表明此时期内,人类活动不断加强,大面积天然植被生态系统(包括草地、林地及灌木林地)被改造成农田,同时部分耕地撂荒转换为草地与灌木林地。1990—1995 年,耕地转为减少趋势,净减少 4.61%;灌木林地和草地仍处于减少趋势,但净变化速度显著低于前期,林地变化趋势转变为增加态势,建设用地继续扩大;趋势指数表明,该时段各地类均处于平衡或相对平衡态势,双向转换过程显著加强,尤其草地与耕地。耕地仍主要转向草地(67.61%)、林地(17.75%)和灌木林地(10.74%),草地主要转向耕地(70.69%)、林地(17.46%)和灌木林地(9.72%)。表明在 SLCP 实施前,研究区耕地扩张及林地萎缩趋势虽已得到逆转,但耕地撂荒日益严峻,同时存在垦荒现象,致使草地面积减少。

安塞县于 1999 年开始实施大规模的退耕还林工程。1995—1999 年,其间由于 SLCP 的实施,耕地面积减少 120.92 km²,净变化速度为前期的 3.17 倍;林地和建设用地继续增加,灌木林地与草地仍处于递减态势;除草地仍处于相对平衡状态,双向转换较频繁外,其他地类均处于不平衡状态;此时期内,新增未成林造林地面积 198.32 km²,且主要由草地和耕地转入,分别占转入总面积的 62.18% 和 33.22%。就转换方向而言,此时段耕地仍主要转向草地(67.83%),其次为未成林造林地(11.37%);草地主要转向耕地和未成林造林地,而林地与灌木林地主要转向草地。1999—2006 年,在 SLCP 的推动下,耕地面积显著降低,净变化速度为前期的 1.89 倍;林地与建设用地缓慢增加,而草地面积基本保持稳定;未成林造林

地面积大幅度增加,净变化 149.05%;除草地外,其他地类均处于不平衡或极度不平衡状态,以单向转换为主,且未成林造林地仍主要由草地和未利用地转入,分别占 51.72% 和 37.19%。2006—2010 年,耕地面积继续减少,但相对前期减少幅度显著降低,其净变化速度仅为前期的 71.36%;未成林造林地面积增加,净变化较前期显著降低;林地与草地均处于微弱的增加趋势。上述结果表明,SLCP 显著增大了研究区耕地递减的趋势,且在 1999—2006 年时段,影响最大,致使林地小幅度增加,草地趋于稳定并呈微弱增加趋势,而未成林造林地面积占土地总面积的比重显著加大[图 3(b)]。

就整个研究时段而言,耕地面积减少,净减少 38.36%;林地与建设用地增加,而草地和灌木林地处于减少态势;至 2010 年,未成林造林地面积达 609.62 km²,显著大于研究区天然林地面积。表 3 表明,除 1990—1995 年,研究区 LUCC 处于准平衡态势外(状态与趋势指数 P_i 为 0.27),其他时段均处于不平衡状态($P_i > 0.5$),单向转换较频繁;SLCP 显著加大了研究区 LUCC 的净变化速度,至 2006 年速度有所减慢,但仍显著高于 SLCP 实施前的变化速度。

4 讨论

4.1 土地利用/覆被分类及 SLCP 对 LUCC 的影响

本文利用遥感资料,获取研究区 1978—2010 年土地利用/覆被数据,并基于统计模型分析了研究区 LUCC 过程。胡明等^[30]利用统计资料分析了 1999—2005 年安塞县土地利用的变化及经济的变化,表明 1999—2000 年造林面积(包括退耕还林面积与荒山造林地面积)为 227.1 km²,到 2005 年共造林 735.7 km²,均大于本文 1999 与 2006 年两个时期的未成林造林地面积(分别为 198.3 km² 和 441.3 km²)。上述差异主要由两个方面原因导致,首先统计数据仅考虑了各年造林面积,而未考虑未成林造林地向其他地类的转换过程;其次由于受遥感数据空间分辨率的局限性,部分零碎的未成林造林地可能被划分为其他地类。根据统计资料,1990、1999 和 2005 年耕地面积分别为 11.9×10^4 、 9.7×10^4 和 7.1×10^4 hm²,与本文遥感影像得到的面积(分别为 11.1×10^4 、 9.4×10^4 和 6.6×10^4 hm²,其中 6.6×10^4 hm² 为 2006 年面积)较接近,但本文获取的面积均小于统计中的面积;主要是由于研究区地形较复杂,部分零碎的坡耕地被误划分成草地,同时统计数据自身也具有一定的不确定性。本文利用遥感方法获取的数据与统计数据存在一定的偏差,遥感数据能够更加客观地获取土地利用信息,但由于受空间分辨率的限制,导致其数据精度受限,尤其是针对面积较小、分布零碎的地物难以区分,本文中的建设用地、水域及未利用地的分类均存在一定误差,但由于其所占比例极小,对正确评估 SLCP 的影响较小。

高时间分辨率的土地利用/覆被信息是正确认识快速 LUCC 过程的关键。以安塞县耕地变化为例,如果仅考虑 1978 年与 2010 年两个时段的面积变化将忽略其在前一时段(1978—1990 年)的增长过程;耕地虽整体呈先增后减态势,但不同时段净变化速度差异显著,本文划分为 6 个时期对研究区 LUCC 探讨,可有效区分不同时段 LUCC 过程的差异,尤其在土地变化较快的区域。

本研究表明 SLCP 导致研究区耕地面积显著降低而未成林地快速增加,并加大了研究区 LUCC 的速度。至 2010 年,未成林造林地面积已显著大于天然林地,研究区植被覆盖(包括林地、灌木林地、草地及未成林造林地)面积从 1995 年的 61.6% 增加到 2010 年的 77.9% [图 3(b)]。

4.2 退耕还林工程的生态后果

(1) 土壤侵蚀及产流量降低。降低土壤侵蚀是黄土高原实施 SLCP 的主要目的。本研究表明 SLCP 显著增加了植被覆盖的面积,而在黄土高原,有研究表明土壤侵蚀与植被覆盖间具有较显著的负线性相关关系^[31]。Li 等^[32]发现地表植被覆盖的增加,特别是林地及草地的增加导致黄土高原的土壤侵蚀在 1999—2006 年间降低了 38.8%。彭文英等^[13]根据野外观测资料,比较了本研究区不同农耕地的产沙量,表明在本研究区内,SLCP 具有减沙效应,在降雨量较大时尤为显著,且 SLCP 减沙效应随坡度的增加而增大。同时,不同学者通过模型^[33-34]或实地观测^[13]均表明 SLCP 可降低黄土高原的产流量。例如,Sun 等^[33]通过模型模拟表明 SLCP 导致黄土高原产流量平均降低 50%。彭文英等^[13]在安塞县的研究亦表征出 SCLP 的减流效应,但降雨量较小时减流效应不显著。

(2) 土壤属性的改变。土地利用变化可改变土地覆被,进而导致植被生物量及土壤碳储量的改变。有研究表明耕地转换为植被覆盖类型可促进黄土高原的碳吸收^[35-36]。例如,Li 等^[36]研究表明,耕地转换为林地(23 a 后)可导致土壤碳增加 76%。尽管如此,树种的选择对造林后土壤碳库变化影响较大^[37]。SLCP 还可能具有改善黄土高原的土壤结构及土壤质量^[36]、促使土壤营养元素趋于稳定^[35]等效应。

(3) 退耕还林工程的负面效应。当降雨量充足时,由于树木可保护土壤并具有涵养水源的效应,耕地转换为林地可改善水资源环境^[38],反之则可能加剧干旱。因此,尽管 SLCP 增大了植被覆盖的面积,在黄土高原干旱/半干旱区,大规模的造林可能加剧水资源短缺,结果可能导致造林区域植被覆盖度降低,进而对植被多样性产生不利影响^[39-40]。SLCP 虽可能控制土壤侵蚀,但种植的树木可能消耗更多的土壤水分,进而威胁生态系统长期的可持续发展。Cao 等^[40]以包括安塞县在内的 5 个示范县为例,研究了 SLCP 对植被覆盖的影响,结果表明 SLCP 导致造林区域植被覆盖度降低 30.5%。且有证据显示自 1949 年以来,在中国北方干旱及半干旱区植树的存活率仅为 15%^[39]。树种选择不当或者过多强调植树和种植灌木被认为是导致上述负面效应的主要原因^[41-42]。SLCP 等造林工程虽能显著增大植被覆盖类型的面积,但植被存活率较低,如何科学地造林,增加造林的成活率亦是进一步研究的重点。

4.3 退耕还林工程的社会经济后果

与生态后果相比,SLCP 的社会经济后果受到更多学者的关注^[7],且其后果通常是正面的^[43]。SLCP 对农民的收入及农村劳动力的转移均具有重要影响。1999—2005 年间,研究区农民的年净收入从 1 504 元增加到 2 000 元^[44],其中 SLCP 对农民的财政补助占农民净收入的 11%,且比例随着农民贫困程度的增加而增大^[45]。有研究表明即使 SLCP 可能导致黄土高原耕地减少及生产模式的转变,仍可能在实现环境保护的同时,增加生产力^[46]。

由于 SLCP 涉及的土地面积巨大,参与的农民数量巨大,因此分析农民对工程实施的态度极为重要。有研究表明研究区大部分农民支持 SLCP^[45,47],但较少农民认为植树(8.9%)或者种植牧草(2.2%)是最好的选择,且有 37.2% 的人表示在 2018 年工程补助停止发放时将重新开垦退耕的土地^[47]。因此大量恢复的植被面临重垦的风险,为了保证工程能够成功,需要采取一系列政策,如 SLCP 必须给农民与成本相当的补助,创造更多在适宜耕地上使用的农产品和技术,创造就业机会以满足农民的需求等。

5 结论

本文研究结果表明 SLCP 可显著改变黄土高原的土地利用/覆被格局,主要表征为未成

林造林地的快速增加、耕地的显著降低及研究区 LUCC 速度的显著增大。这种变化可能降低土壤侵蚀及产流量、增加土壤碳储量、改良土壤结构及质量并使土壤营养元素趋于稳定。同时这种变化亦可能加剧水资源短缺,降低造林区域植被覆盖度,进而影响生物多样性。由于 SLCP 能提高农民收入,大部分农民支持 SLCP,但在财政补助终止后,已造林区域亦面临重垦的风险。本研究结果不仅深化了对 SLCP 影响的认识,而且有助于研究区内土地利用规划及决策。进一步研究应加强 SLCP 在区域和国家尺度生态环境效应的综合评估,尤其 SLCP 的长期后果。

参考文献 (References):

- [1] WWF (WORLD WIDE FUND for Nature). Report suggests China's Grain-for-Green plan is fundamental to managing water and soil erosion [EB/OL]. <http://www.wwfchina.org/english/loca.php?loca=159>, 2003 / 2011-03-15.
- [2] Xu J T, Yin R S, Zhou L, et al. China's ecological rehabilitation: The unprecedented efforts and dramatic impacts, and requisite policies [J]. *Ecological Economics*, 2006, 57(4): 595-607.
- [3] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, 435: 1179-1186.
- [4] Bennett M T. China's sloping land conversion program: Institutional innovation or business as usual? [J] *Ecological Economics*, 2008, 65: 699-711.
- [5] FAO. Global Forest Resources Assessment 2000 Main Report [M]. Rome: FAO, 2010: 140.
- [6] Wang C. Evaluation of the economic and environmental impact of converting cropland to forest: A case study in Dunhua County, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85: 757-773.
- [7] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309: 570-574.
- [8] Zhao S Q, Liu S, Li Z, et al. Ignoring detailed fast-changing dynamics of land use overestimates regional terrestrial carbon sequestration [J]. *Biogeosciences*, 2009, 6: 1647-1654.
- [9] 中国科学技术协会学会工作部. 中国土地退化防治研究——全国土地退化防治学术讨论会 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 10. [Service Department of China Society and Technology Association. Study on the Prevention of the Land Degeneration in China-Nationwide Symposium on the Prevention of the Land Degeneration. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 10.]
- [10] 师长兴, 章典. 中国洪涝灾害与泥沙关系 [J]. 地理学报, 2000, 55(5): 627-636. [SHI Chang-xing, ZHANG Dian. Analysis of impacts of sedimentation on flooding disasters in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 627-636.]
- [11] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. [CAI Qiang-guo, WANG Gui-ping, CHEN Yong-zong. Process and Simulation on the Sediment Yield of the Erosion in Small Watershed in the Losses Plateau. Beijing: Science Press, 1998.]
- [12] Li Y Q, Zhang W, Reicosky D C, et al. Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep cultivated hillslope in the Chinese Loess Plateau from 1898 - 1954 and 1954 - 1998 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, G01021, doi:10.1029/2005JG000107.
- [13] 彭文英, 张科利, 江忠善, 等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征 [J]. 地理科学, 2002, 22(4): 397-402. [PENG Wen-ying, ZHANG Ke-li, JIANG Zhong-shan, et al. Runoff and sediment changes characteristics after returning cropland to grass on the Loess Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(4): 397-402.]
- [14] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278. [PENG Wen-ying, ZHANG Ke-li, CHEN Yao, et al. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the loess sloping croplands. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 272-278.]
- [15] 刘志超, 杜英, 徐丽萍, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还林(草)工程的经济效应——以安塞县为例 [J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1473-1452. [LIU Zhi-chao, DU Ying, XU Li-ping, et al. Analysis on economical effect of project of "returning farmland to forest and grassland" in the loess hilly and gully area; A case study in Ansai County. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1473-1452.]
- [16] Strahler A H. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10: 135-163.

- [17] Conese C, Maselli F. Use of error matrices to improve area estimates with maximum likelihood classification procedures [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40: 113-124.
- [18] Edirwickrema J, Khorram S. Hierarchical maximum-likelihood classification for improved accuracies [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 1997, 35: 810-816.
- [19] Zheng M, Cai Q, Wang Z. Effect of prior probabilities on maximum likelihood classifier [C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'05 Proceedings 2005 IEEE International. 2005: 3753-3756.
- [20] Hansen M, Dubayah R, Defries R. Classification trees, an alternative to traditional land cover classifiers [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 1075-1081.
- [21] Rogan J, Franklin J, Roberts D A. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 143-156.
- [22] Kavzoglu T. Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24: 850-858.
- [23] Cunningham M A. Accuracy assessment of digitized and classified land cover data for wildlife habitat [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78: 217-228.
- [24] Altan O. Use of photogrammetry, remote sensing and spatial information technologies in disaster management, especially earthquakes [J]. *Geo-information for Disaster Management*, 2005, 4: 311-322.
- [25] Luedeling E, Buerkert A. Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery and geological survey data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1181-1195.
- [26] Janssen L L F, Vander Welf F J M. Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: A review [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60: 419-426.
- [27] Pontius R G, Shusas E, McEachern M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 101: 251-268.
- [28] Luo G P, Zhou C H, Chen X, et al. A methodology of characterizing status and trend of land changes in oases: A case study of Sangong River watershed, Xinjiang, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88: 775-783.
- [29] 周德成, 罗格平, 尹昌应, 等. 近 50a 阿克苏河流域土地利用/覆被变化过程 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 275-284. [ZHOU De-cheng, LUO Ge-ping, YIN Chang-ying, et al. Land use/cover change of the Aksu River Watershed in the period of 1960-2008. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 275-284.]
- [30] 胡明, 权轻舟. 安塞县退耕还林(草)工程对土地利用变化及经济发展的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16567-16569. [HU Ming, QUAN Qing-zhou. Influence of returning farmland to forest (grass) on the land utilization change and economic development of Ansai County. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(29): 16567-16569.]
- [31] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau area of China [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198: 263-268.
- [32] Li C B, Qi J G, Feng Z D, et al. Quantifying the effect of ecological restoration on soil erosion in China's Loess Plateau region: An application of the MMF approach [J]. *Environmental Management*, 2010, 45: 476-487.
- [33] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328: 548-558.
- [34] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, et al. Developing a decision support tool for China's re-vegetation program: Simulating regional impacts of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251: 65-81.
- [35] Liu X, Li F M, Liu D Q, et al. Soil organic carbon, carbon fractions and nutrients as affected by land use in semi-arid region of Loess Plateau of China [J]. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 146-152.
- [36] Li G L, Pang X M. Effect of land-use conversion on C and N distribution in aggregate fractions of soils in the southern Loess Plateau, China [J]. *Land Use Policy*, 2010, 27: 706-712.
- [37] Fu X L, Shao M G, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 155: 31-35.
- [38] Schume H, Jost G, Hager H. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech

- and Norway spruce [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289:258-274.
- [39] Cao S X. Why large-scale afforestation efforts in China have failed to solve the desertification problem [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (21):8165-8165.
- [40] Cao S X, Chen L, Yu X X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions: A case study in northern Shanxi Province [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46, 536-543.
- [41] Chen L D, Wang J P, Wei W, *et al.* Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259:1291-1298.
- [42] Cao S X, Chen L, Shankman D, *et al.* Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104: 240-245.
- [43] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, *et al.* Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *PNAS*, 2008, 105: 9477-9482
- [44] 胡明,马继东. 安塞县土地利用变化与经济的关系[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1):182-185. [HU Ming, MA Ji-dong. Changes of land use and its impacts on the economy in Ansai County. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1):182-185.]
- [45] 徐勇,张同升,杨勤科. 黄土高原安塞县生态退耕情景及农业影响[J]. 地理学报, 2006, 61(4):369-377. [XU Yong, ZHANG Tong-sheng, YANG Qin-ke. Ecological de-farming scenarios and their influences on agricultural development of Ansai County on Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4):369-377.]
- [46] Yao S B, Li H. Agricultural productivity changes induced by the sloping land conversion program: An analysis of Wuqi County in the Loess Plateau region [J]. *Environmental Management*, 2010, 45:541-550
- [47] Cao S X, Xu C G, Chen L, *et al.* Attitudes of farmers in China's northern Shaanxi Province towards the land-use changes required under the Grain for Green Project, and implications for the project's success [J]. *Land Use Policy*, 2009, 26: 1182-1194.

Impacts of the Sloping Land Conversion Program on the Land Use/Cover Change in the Loess Plateau: A Case Study in Ansai County of Shaanxi Province, China

ZHOU De-cheng, ZHAO Shu-qing, ZHU Chao

(a. College of Urban and Environmental Sciences, b. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Induced by population pressure, economic growth, and historic exploitation, a large portion of China's primary forests and wetland was depleted, and a high percentage of its farmland and grassland was degraded. These ecosystem disturbances caused extensive desertification, flooding, soil erosion, dust storms, elevated levels of greenhouse gas emissions, and severe damage to wildlife habitat. In order to address devastating environmental crises and improve human well-being, China has been undertaking several major ecological restoration efforts, of which the Sloping Land Conversion Program (SLCP) (also called Grain for Green Project) is the largest land retirement/reforestation program in the developing world, which can alter the land use/cover pattern in a considerably short time period. Here, we characterized the impacts of the SLCP on the land use/cover pattern and their consequences in Ansai County on the Loess Plateau, China, by using Landsat MSS/TM/ETM + images of six periods of 1978, 1990, 1995, 1999, 2006 and 2010. Land use/cover information was obtained using satellite remote sensing techniques. Then

the impacts of SLCP on the land use/cover pattern were analyzed by the statistical models. Grassland, cultivated land and woodland were the three dominant land cover categories of the study area, and the land use/cover change was generally in unbalanced status dominated by one-way transition. In the whole research period, cultivated land declined substantially after a small increase, with an overall decreasing rate of 38.4%, woodland decreased first then followed by an increase, with an overall increasing rate of 4.36%, and shrubs together with grasslands decrease while the built-up area increased continuously. SLCP accelerated the decline trend of the cultivated land, and increased the newly forested land substantially. The area of newly forested land had significantly exceeded that of the natural forest. These changes may reduce soil erosion and water yield, restore the soil structure, and increase the soil organic matter. Most farmers support the SLCP because it can increase farmer's net income. Nevertheless, the potential negative consequences of SLCP can never be ignored. These findings are not only useful for an integrated understanding over the impacts of SLCP, but also for the planning and decision-making of the eco-restoration projects together with the eco-environmental protection.

Key words: Loess Plateau; sloping land conversion program; land use/cover change; Ansai County