黄土高原南部土地利用/覆被变化的土壤侵蚀效应

卞鸿雁，庞奖励，任志远，赵艳雷，毛沛妮，郑树伟

（陕西师范大学 旅游与环境学院，陕西 西安 710062）

摘　要：基于 3S 技术对黄土高原南部地区土地利用/覆被变化及空间分布格局进行了综合测评，同时应用通用土壤流失方程(USLE)定量研究了不同土地利用方式下的土壤侵蚀效应。研究表明，研究区 1980—2005 年共有 1 123.80 km^2 耕地被用为城镇建设用地，建设用地面积净增了 1 238.29 km^2，林地、草地面积总量变化小，但局部地区流转特征显著；与此同时，该区土壤侵蚀模数从 11.54 t/(hm^2 · a)增至 13.81 t/(hm^2 · a)，1980 和 2005 年黄土沟壑区侵蚀模数的峰值分别为 1 708.52 和 1 584.69 t/(hm^2 · a)。该区域土壤侵蚀效应与土地利用空间格局耦合性较强，林地、草地由于分布区域海拔高，坡度陡，侵蚀强烈，而地势低洼、平坦地区(建设用地、耕地、未利用地)的土壤侵蚀强度小。林地、草地的土壤侵蚀效应由于受到地形因素的影响，对降雨侵蚀因子增强的响应尤其明显。2005 年该区林地和草地的平均侵蚀模数分别增加了 2.34 和 7.32 t/(hm^2 · a)，并且微度以上侵蚀等级的面积有所增加。

关键词：土壤侵蚀；土地利用变化；黄土高原南部

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2013)02-0011-06　　**中图分类号**：S714.7

Effects of Soil Erosion on Land Use and Land Cover Change in Southern Loess Plateau

BIAN Hong-yan, PANG Jiang-li, REN Zhi-yuan, ZHAO Yan-lei, MAO Pei-ni, ZHENG SHu-wei

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

Abstract: Land use change influences vegetation distribution on the earth surface. Vegetation coverage, tiny terrain, physical properties and chemical properties of soil, as well as erosion resistance, lead to an increasingly complex system for mutual responses to land use/cover changes. The research of soil erosion with regard to different land use types is therefore of great importance. In this study, we implemented the universal soil loss equation to simulate the soil erosion of Southern Loess Plateau based on different land use type with the technologies of 3S. The results showed that the cultivated land and construction land changed significantly, and 1 123.80 km^2 cultivated land has turned to construction land in the past 25 years at southern loess plateau; the construction land has increased 1 238.29 km^2. On the whole, forest and meadow changed little, but they changed significantly in the part of the study area. At he same time, the average soil erosion modulus of southern loess plateau has increased from 11.54 t/(hm^2 · a) to 13.81 t/(hm^2 · a), the peak value of Southern Loess Plateau were Gully region of Loess Plateau which were 1 708.52 t/(hm^2 · a), 1 584.69 t/(hm^2 · a) in 1980 and 2005. the research also shows that the soil erosion is closely related to the spatial distribution pattern of land cover. In the study area, forest and meadow's were steeper and higher than construction land, cultivated land and unused land, so the latter(construction land, cultivated land and unused land)'s soil erosion modulus was lower than the former(forest and meadow). The meadow land and forest were infected by the terrain, which infected the rainfall factors severely. Forest and meadow's average soil erosion modulus were increased 2.34 t/(hm^2 · a) and 7.32 t/(hm^2 · a) respectively. Among all the erosion grade, above the grade of micro-erosion's area has increased.

Keywords: soil erosion; land use change; Southern Loess Plateau

收稿日期：2012-04-09　　**修回日期**：2012-04-27

资助项目：国家自然科学重点基金项目“汉江上游(南水北调水源区)万年尺度古洪水水文学研究”(41030637)，“汉江上游河谷风成黄土堆积及成壤改造对全新世气候变化的响应规律”(41271108)

作者简介：卞鸿雁(1986—)，女(汉族)，内蒙古自治区赤峰市人，博士研究生，研究方向为土地资源开发与环境演变。E-mail bb_hongyan@sina.com。

国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)和全球地圈与生物圈计划(IGBP)将土地利用/覆盖变化(LUCC)研究推到了空前发展的阶段,LUCC 研究重点也从土地利用变化情况调查、机制与驱动力的研究转变到由此引发的环境效应等相关问题[1-2]。土地利用变化是影响地表植被类型、覆盖度、微地形、土壤理化性质、侵蚀动力、抗侵蚀阻力乃至区域生态安全的重要因素,而土壤要素作为土地生态系统的核心要素,容易受到土地利用方式转变的剧烈影响。据多个典型区研究表明,不同土地利用方式的土壤侵蚀强度差异性显著,通常旱地及低覆被率灌草地是发生土壤侵蚀严重的地区[3-5],但区域间土壤侵蚀强度差别较大。基于土地利用变化的土壤侵蚀影响研究是土地利用变化环境效应研究的新重点[5]。

黄土高原南部地区包括关中城市群,太原城市群及部分中原城市群。该区人类活动影响剧烈,区域土地利用的影响尤其深刻,加之生态环境脆弱,水土流失问题尤其严重。据研究表明[6-10],黄土高原 90%的产沙均流向黄河,水土流失面积可达 4.54×10^5 km^2,故区域土壤侵蚀问题亟待解决。研究黄土高原南部地区土地利用变化及空间格局对土壤侵蚀效应的强度及其分布的影响,可为区域调整土地利用结构、保证土地资源可持续发展、区域水土保持综合治理以及区域植被恢复提供理论依据。

1 研究区划定及概况

通过对黄土高原地区自然状况的分析,基于黄土高原地区气象数据(多年平均降水量、平均气温、相对湿度、干燥度、温湿指数等)、地貌地类型、土地利用类型图、土壤侵蚀图、土壤类型图等数据,运用因子分析、方差分析、图层叠加等方法确定黄土高原南部地区行政区界限。黄土高原南部地区地处东部季风气候向西北大陆性气候过渡地带,年日照总辐射量在 503.52~630.58 MJ/m^2,年均温度 7.72~14.31 ℃,年降雨量在 390~710 mm。区域土壤类型复杂多样,地貌类型以黄土塬、黄土台塬、河谷平原为主,植被类型复杂包括高山草甸、落叶阔叶林、典型草原及草本栽培植被等 17 个植被类型。研究区内水系发达,境内河网较密集,河流年内径流量变化大。

2 数据来源

采用的基础数据包括:黄土高原南部地区比例尺为 1∶5 万 DEM、1980 和 2005 两期 TM 遥感影像数据,每期影像 18 景,空间分辨率为 30 m、黄土高原南部土地利用现状图(用作解译参考)、比例尺为1∶100 万的土壤类型图、通过查阅河南省、陕西省、山西省、宁夏自治区、晋中市、天水市土壤志以及中国土壤数据库网站建立黄土高原南部地区土壤质地(土壤的黏粒、沙粒、粉沙粒、粉砂以及极细砂的含量)及有机质含量数据库、1980 和 2005 年黄土高原南部地区 38 个气象站点的逐月降雨量数据、1980 年和 2005 年的 3—9 月份的 35 期归一化植被指数(NDVI)影像。

3 研究方法

3.1 土地覆被解译及土地利用变化

研究基于 Erdas 解译平台,进行几何校正(误差控制在 0.5 个像元内)、拼接、裁剪、投影转换、编码、精度检验(总体分类精度 84.615 5%),完成土地利用类型解译工作。以 ArcGIS 9.3 作为数据处理平台,将 1980 和 2005 年土地覆被数据、DEM 数据进行空间叠加,构建区域土地利用的转移矩阵,分析 1980—2005 年的土地利用数量变化特征及其高程、坡度空间格局。

3.2 土壤侵蚀量估算模型

Wichmeier 和 Smith 所建立的土壤流失通用方程(USLE)为目前适用性最广,可操作性最强的估算模型。故采用此方程对黄土高原南部的土壤流失量进行估算,USLE 的基本形式为:

$$A_m=R\cdot K\cdot C\cdot LS\cdot P$$

式中:A_m——研究区域每年每公顷上的土壤实际的侵蚀量〔t/(hm^2·a)〕;R——降雨侵蚀力因子;K——土壤可侵蚀性因子;C——植物覆盖因子;LS——地形(坡长坡度)因子;P——土壤保持措施因子。

虽然通用水土流失方程结构固定,但模型因子提取方法众多,需要科学选取因子模型的构建方法,在对相关文献深入研究的基础上,选择模型考虑了模型的来历和使用条件,遵循区域自然条件的相似性原则,并考虑到 R 因子与 K 因子量纲统一的问题,均获得较好的效果,各因子的模型构建[11-16]为:

(1) 降雨侵蚀力因子(R):

$$R=105.44P_{6-9}^{1.2}/P-140.96$$

式中:P_{6-9}——研究区 6—9 月降雨量之和。

(2) 地形因子(LS):

$$LS=(\frac{\lambda}{20})^m(\frac{\alpha}{10})^n$$

式中:α——坡度因子;m——坡长因子;n——坡度因子。坡长因子运用多流向计算方法(MFD)计算单位汇水面积。

(3) 土壤可侵蚀性因子(K):

$$K=\frac{1}{100}\times\{2.1\times(n_1\times n_2)^{1.14}\times12-O_a\times10^{-4}+3.25\times(M-2)+2.5\times(F-3)\}$$

式中:n_1——粉砂与极细砂占总粉砂的含量;n_2——粉粒与砂粒占土壤的含量;O_a——有机质含量(%);M——有机质含量分级;F——黏粒含量的分级。

(4) 水土保持措施因子(P):采用欧阳志云对不同的土地利用方式的赋值结果,将耕地的水浇地赋值为 0.15,旱地的 P 值为 0.5,其他类型的土地利用类型取值为 0.5。

(5) 植被覆盖因子(C):根据植被的的覆盖度确定田间管理因子,将林地的覆盖度 0～100%等分 5 级其 C 值分别为 0.1,0.08,0.06,0.02,0.004。将草地的覆盖度 0～100%等分 5 级其 C 值分别为 0.45,0.24,0.15,0.09,0.043。水体的 C 值为 1,耕地为0.23。

$$F=\left(\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}\right)^k$$

式中:F——植被覆盖度,$NDVI_{min}$——当土地没有植被覆盖或者可以表示为图像当中某种土壤类型NDVI最低值;$NDVI_{max}$——某种土地利用类型的所达到的 NDVI 的最大值。K——经验系数,一般取值为 1。

4　结果与分析

4.1　土地利用/覆被变化

黄土高原南部地区农牧业历史发展悠久,耕地、草地、林地是区域主要土地利用类型,但随着西部大开发战略以及城市化进程的推进,建设用地不断扩张,耕地、林地、草地不断减少。1980—2005 年,耕地减少 1 443.22 km^2,建设用地增加 1 238.29 km^2;林地、草地面积变化幅度较小,分别增加 55.48 和 170.89 km^2,水域、未利用地变化细微。

为量化区域各地类间流转情况,借助马尔科夫矩阵对区域 1980—2005 年的土地类型之间的流转数量进行了分析。由表 1 可以看出,研究区 25 a 来,1.28%的林地被转化为其他类型,林地面积增加区域主要分布在沙化问题严重的延安市和庆阳市的西北部,减少区集中分布于黑河流域、昕水河流域、陇东部分地区和三门峡地区;1.83%的草地面积发生变更,草地变化区主要分布在研究区北部,其中,泾河流域北部、子午岭、黄龙山地区、太行山西麓、洛阳市、阳泉市草地退化问题尤其明显,草地增加区零散分布于北部黄土丘陵沟壑区。耕地作为建设用地的主要流入源,25 a 间转化量达 1 123.80 km^2,占该区耕地减少总面积的 77.87%,主要分布于关中城市群,占 1985 年耕地面积的 1.12%。建设用地在 25 a 间流出量甚微,仅占总量的 0.12%,其流入源包括耕地,林地和水体。其他地类(水体、未利用地)变化特征微小。

由此可见,黄土高原南部地区的土地利用格局主要受到耕地、建设用地两大地类的变化的控制,保障区域耕地面积动态平衡与提高城市化、工业化水平已成为区域土地资源可持续发展的首要矛盾。

表 1　黄土高原南部 1980－2005 年土地利用变化转移矩阵　　km^2

1980 年	2005 年						
	林 地	草 地	耕 地	建设用地	水 体	未利用地	总 计
林 地	50 407.64	501.31	50.72	30.92	19.71	0.99	51 011.29
草 地	317.93	65 373.04	737.29	79.76	82.63	1.19	66 591.83
耕 地	303.09	852.93	97 460.30	1 123.80	262.49	2.18	100 004.80
建设用地	0.01	0.83	2.90	3 551.68	0.56	0	3 555.99
水 体	1.33	31.42	307.93	8.11	2 069.91	0	2 418.71
未利用地	36.77	3.19	2.44	0	0.34	132.89	175.62
总 计	51 066.77	66 762.72	98 561.58	4 794.28	2 435.65	137.24	223 758.24

4.2　土地利用空间格局特征

地形对区域的水、热、养分进行了再分配,是影响区域土地利用空间格局形成的关键要素,它直接决定土壤侵蚀过程的地形因子并影响着降雨侵蚀力因子,故研究土地利用变化的时空格局十分必要[17-21]。选取海拔和坡度这两个地形的主要指标对黄土高原南部地区土地覆被空间格局进行研究。通过分析高程空间分布格局可知,90%以上的研究区海拔均处于 2 000 m以下,并且不同土地利用类型的海拔分异特征明显,87.37%的耕地分布于 1 500 m 以下的高程带,其中海拔低于 1 000 m 的耕地占耕地总面积的 58.15%;1/2 以上的建设用地处于低于 500 m 的平原带,87.14%的建设用地高程小于 1 000 m。林地和草地与其他地类相比,分布的海拔较高,集中在 1000～2000 m。黄土高原南部地区坡度的分异规律表现为:坡度≤5°的土地类型主要是建设用地、未利用地、

水体，并超过这些地类各自面积的 50%。坡度≤15°的地区多为耕地和建设用地，草地的坡度主要分布在 5°～15°之间，而林地的坡度多分布在 5°～35°之间，占林地总面积的 98.74%(表 2)。通过对坡度和高程分异规律分析，不难发现，地势平坦、低洼的地区多被建设用地、耕地所占据，而林地、草地多分布于海拔高，地势陡峭的地区。这主要受到人为和自然因素的双重影响，首先，林地、草地对高海拔、大坡度的地区适应强；其次地形平坦、低洼的区域更适合人口居住、聚集、发展工业及农业，故低洼、平坦的林地和草地逐渐被建设用地和耕地所取代，进而形成目前的空间分布格局。

表 2 研究区不同土地类型的高程及坡度空间分异特征

面积比例/%	高程/m				坡度单位/(°)			
	≤500	500～1 000	1 000～1 500	1 500～2 000	≤5	5～15	15～25	25～35
林 地	1.52	13.4	62.49	17.18	1.03	29.36	56.05	13.34
草 地	3.28	23.42	53.59	14.37	2.82	48.69	43.52	4.86
耕 地	23.36	34.79	29.22	10.62	35.42	47.48	16.55	0.54
建设用地	50.66	36.48	11.52	1.24	77.37	20.2	2.35	0.08
水 体	57.99	27.33	11.22	3.38	53.21	34.53	10.79	1.47
未利用地	58.27	6.47	13.67	16.55	55.07	18.12	15.22	5.80

4.3 土壤侵蚀动态变化

4.3.1 土壤侵蚀强度空间分异 在 ArcGIS 9.3 技术平台支撑下，将 5 个主要因子转换为 Albers 投影及 90 m×90 m 栅格图层，基于地统计分析功能将 5 个侵蚀因子图层相乘即得到 1980—2005 年黄土高原南部地区的土壤侵蚀强度空间分布图(附图 1)，依据中华人民共和国水利部 2008 年 4 月 4 日所实施的新土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)对研究区土壤侵蚀模数分等定级，并测评了土壤侵蚀强度的空间格局。结果表明，1980 和 2005 年研究区平均土壤侵蚀等级均属于轻度侵蚀标准。2005 年与 1985 年相比，土壤侵蚀模数略有上升，分别为 11.54 和 13.81 t/(hm^2·a)。研究区中黄土沟壑区侵蚀强度最大，但由于退耕还林还草工程的实施，2005 年沟壑区侵蚀模数最大值与 1980 年相比，略有下降，1980 和 2005 年峰值分别为 1 708.52 和 1 584.69 t/(hm^2·a)。

分析结果表明，25 a 来区域土壤侵蚀空间格局总体特征明显，局部变化显著。区域侵蚀力总体空间特征表现为河谷平原地区(渭河河谷、豫北平原、汾河冲积平原、沁水盆地)、黄龙山、六盘山等地区土壤侵蚀模数较小。西北部中海拔黄土梁峁区、泾河上游的黄土塬区、昕水河所流经的黄土残塬区及太行山山脉地区的属于土壤侵蚀强烈的集聚区。子午岭、黄龙山地区、洛阳市、阳泉市是局部变化最显著的地区，侵蚀等级由原来的微度和轻度侵蚀转变为轻度和中度侵蚀，主要由降雨量增加和草地覆盖率、森林郁闭度显著降低这 3 个因素共同驱动，致使土壤侵蚀模数迅速增加。

4.3.2 基于土地利用格局的土壤侵蚀评价 将 1980 和 2005 年两期土地利用栅格图(90 m×90 m 的栅格)分别与土壤实际侵蚀量及土壤潜在侵蚀量空间分布图进行叠加。结果表明，受降雨量增加的影响，2005 年区域土壤潜在侵蚀模数比 1980 年有所增加，但两期不同土地利用类型的潜在侵蚀模数排序特征一致，均表现为：林地＞草地＞未利用地＞耕地＞建设用地，这与土地利用类型空间格局密切相关，林地、草地的分布的地区坡度陡、海拔高，地形因子值大，使 2005 年这两类土地利用类型的潜在侵蚀模数分别达到了 182.65 和 148.62 t/(hm^2·a)。而耕地和建设用地多处于地势低缓地带，2005 年土壤潜在侵蚀模数仅为 55.20 和 15.74 t/(hm^2·a)(表 3)。虽然森林和草地的根系对土壤的固结能力明显强于耕地和建设用地，但由于黄土高原南部地区各地类的潜在侵蚀力的差异性，造成 1980 和 2005 年区域土地利用实际侵蚀模数排序为：草地＞林地＞未利用地＞耕地＞建设用地。

表 3 研究区 1980－2005 年基于土地利用的土壤实际侵蚀量与潜在侵蚀量 t/(hm^2·a)

土地利用类型	土壤潜在侵蚀模数		土壤实际侵蚀模数	
	1980 年	2005 年	1980 年	2005 年
耕 地	54.74	55.20	5.55	5.23
林 地	164.48	182.65	10.41	17.73
草 地	136.14	148.62	21.99	24.33
建设用地	14.45	15.74	1.95	7.56
未利用地	66.46	90.04	10.57	8.67
区域平均	103.25	108.42	11.54	13.81

黄土高原南部实际侵蚀量的动态特征主要表现为：1980—2005 年该区侵蚀模数上升了 2.27 t/(hm^2·a)，

平均每年土壤侵蚀总量增加 2.03×10^6 t。各地类中,林地、草地变化量最为显著,分别增加了 18.17 和 12.48 t/(hm^2·a)。结合研究区 1980—2005 年土地利用变化情况,综合分析区域特征得出,虽然草地和林地面积略有增加,但增加区均零散分布于沙化问题严重的黄土丘陵沟壑区,森林、草地质量低,保土能力弱,与此同时,局部地区草地覆盖率和森林郁闭度显著降低(如子午岭、黄龙山、泾河流域北部),并且受到 2005 年降雨侵蚀力突增的影响,致使区域林地和草地平均侵蚀模数呈显著增加。

通过对 1980 和 2005 年研究区不同土地利用类型侵蚀强度的面积构成及变化趋势分析表明,1980 和 2005 年研究区耕地、建设用地、未利用地 75%以上面积处于微度侵蚀,而这些地类中,微度以上侵蚀面积不及地类总面积的 1/10。而草地、林地微度以上侵蚀等级面积远大于其它地类,这与它们的空间分布格局密切相关。1980—2005 年间,林地、草地、建设用地微度以上各等级土壤侵蚀面积都在增加,增加量分别为 13 468.79,4 105.86 和 884.68 km^2,客观地反映了 2005 年的降雨侵蚀力增加、田间管理能力降低的实际,同时也侧面反映了区域整体草地质量下降、林地郁闭度降低、局部植被覆盖率下降、地形崎岖(林地、草地)或裸露地区(建设用地)对降雨响应敏感等问题。结合土地利用类型流转特征及土壤侵蚀空间分布特征分析,草地由微度转为轻度侵蚀及轻度转为中度侵蚀的区域主要分布于黄龙山及子午岭地区、阳泉市、洛阳市,草地由中度转为强烈侵蚀的区域为太行山西麓;林地由微度转为中度的区域主要集中在三门峡地区,林地轻度转为中度侵蚀的区域分布于黑河流域、昕水河流域;2005 年林地极强烈侵蚀比例从 0.53%增加到 1.15%。草地极强烈侵蚀比例从 2.76%增加到 3.52%。依据微度侵蚀以上等级侵蚀面积排序为:草地>耕地>林地>建设用地>未利用地(表 4)。

表 4　黄土高原南部地区 1980－2005 年土壤侵蚀等级面积统计　　km^2

侵蚀等级	耕地		林地		草地		建设用地		未利用地	
	1980 年	2005 年	1980 年	2005 年	1980 年	2005 年	1980 年	2005 年	1980 年	2005 年
微度	77 223.06	76 224.53	39 574.48	26 168.48	34 060.86	30 128.24	3 476.01	3 835.22	166.32	123.72
轻度	12 603.78	12 759.86	7 914.29	16 820.2	17 211.06	17 224.48	50.99	603.44	4.13	10.40
中度	6 527.33	6 355.31	2 581.36	5 983.43	9 444.83	12 016.87	17.00	215.59	2.07	0
强烈	2 457.53	2 138.54	607.86	1 404.22	3 672.55	4 572.39	8.00	67.50	2.07	2.08
极强烈	1 048.42	959.73	270.50	584.84	1 836.27	2 352.64	3.00	38.28	1.03	1.04
剧烈	144.68	123.61	62.81	105.60	366.26	468.11	1.00	34.25	0	0

5　结论

(1) 黄土高原南部地区 1980—2005 年耕地减少 1 443.22 km^2,建设用地增加 1238.29 km^2。其中,1 123.80 km^2 的耕地被城镇建设用地侵占。林地、草地、水体、未利用地总量变化微小,林地、草地局部地区流转特征明显。区域的土地资源的可持续发展的首先需要解决的瓶颈问题是耕地面积安全与城市化过程对建设用地扩张的需求之间的矛盾。

(2) 研究区 1980—2005 年平均侵蚀强度为轻度,但 1980 和 2005 年黄土沟壑区的土壤侵蚀模数的峰值分别达到 1 708.52 和 1 584.69 t/(hm^2·a)。区域土壤侵蚀综合治理的重点应集中在西北部中海拔黄土梁峁区、泾河上游黄土塬区、昕水河所流经的黄土残塬区、太行山脉地区。

(3) 结合土地利用类型的流转特征和侵蚀效应年际变化特点分析可知,虽然 2005 年草地及林地面积比 1980 年略有增加,但由于降雨侵蚀力增加的影响,零散分布于黄土丘陵沟壑区的退耕还林还草区、草地覆盖度显著降低区及森林郁闭度显著降低区,难以抵挡降雨冲刷力度的增加,造成林地和草地平均侵蚀模数分别增加了 2.34 和 7.32 t/(hm^2·a)。

(4) 黄土高原南部地区土壤侵蚀效应与土地利用空间格局耦合性较强。林地、草地虽然具有良好的保土能力,但由于其分布地区地势高耸、陡峭,土壤实际侵蚀模数远大于分布于地势平缓、低洼的耕地和建设用地。此外,由于空间规律的影响,林地和草地对降雨侵蚀力增强、田间管理能力下降的响应更为强烈,2005 年林地、草地的微度以上侵蚀等级的面积均有所增加。

[参 考 文 献]

[1] 中国科学技术协会. 2008—2009 年地理学学科发展报告[M]. 北京. 中国科学技术出版社,2009:74-75.

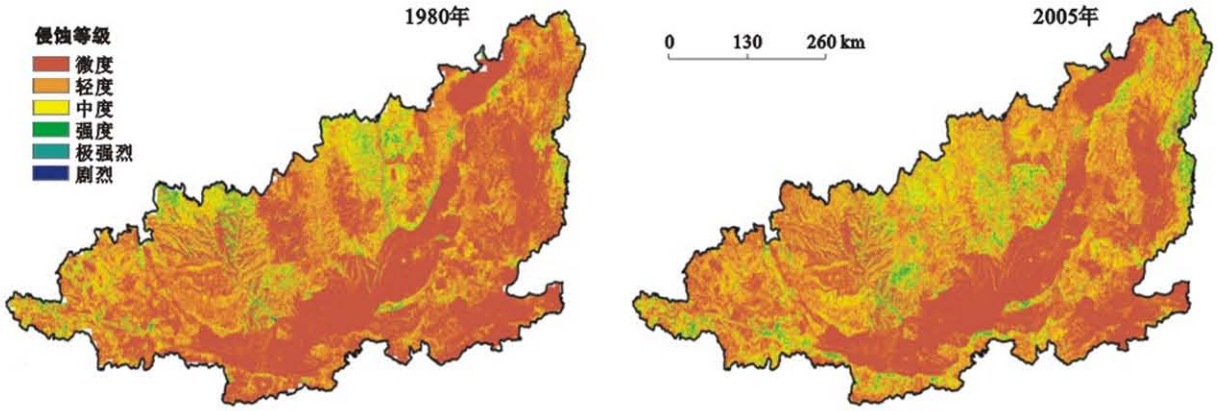
[2] 吴秀芹,蔡运龙. 土地利用/土地覆盖变化与土壤侵蚀关系研究进展[J]. 地理科学展,2003,22(6):576-584.

[3] 许月卿,彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土

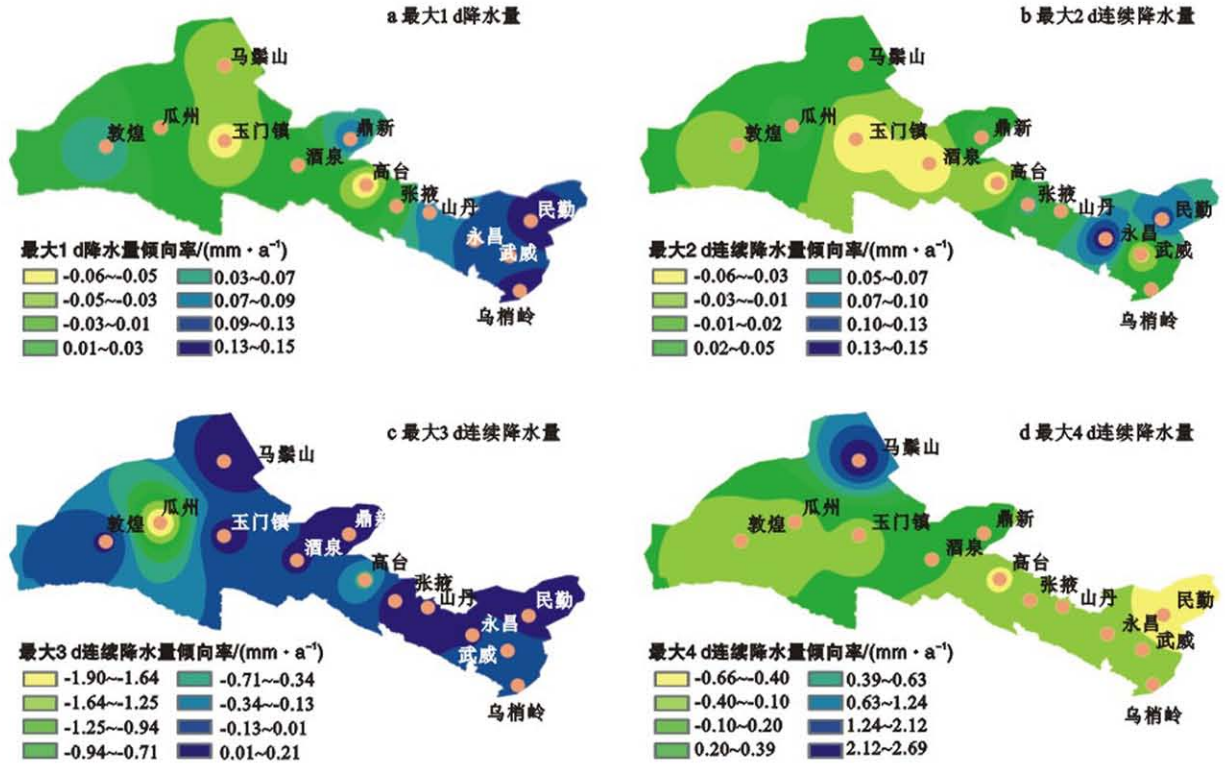
壤侵蚀的影响[J]. 地理科学进展,2003,22(6):576-584.
[4] 刘艳锋,陈学华,贺秀斌. 岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):161-165.
[5] 樊哲文,黄灵光,钱海燕. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. 资源科学,2009,31(10):1787-1791.
[6] 张胜利,于一鸣,姚文艺. 水土保持减水减沙效益计算方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1994.
[7] 姚文艺,李占斌,康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京:科学出版社,2005.
[8] 倪晋仁,李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报,2001,5(56):611-620.
[9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses[R]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Handbook, 1978.
[10] 张胜利,李倬,赵文林,等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 河南 郑州:黄河水利出版社,1998.
[11] 刘秉正. 渭北地区 R 的计算与分布[J]. 西北林学院学报,1993(2):21-29.
[12] 江忠善. 黄土高原水土流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. 西北水保所集刊,1988(7):40-45.
[13] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-19.
[14] 刘宝元,张科利,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999,14(4):345-350.
[15] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报,1999,19(5):607-613.
[16] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.
[17] 陈利顶,张淑荣,傅伯杰,等. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究[J]. 生态学报,2003,23(12):2497-2505.
[18] 孙建光,李保国,卢琦. 青海共和盆地草地生产力模拟及其影响因素分析[J]. 资源科学,2005,27(4):44-49.
[19] Anne M, Sylvie L, Nathalie C, et al. Agricultural land use change and its drivers in mountain in landscapes: A case study in the Pyrenees[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006,114(2/4):296-310.
[20] 闫小培,毛蒋兴,普军. 巨型城市区域土地因变化的人文因素分析[J]. 地理学报,2006,61(6):613-623.
[21] 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测[M]. 北京:科学出版社, 1995.

(上接第 10 页)

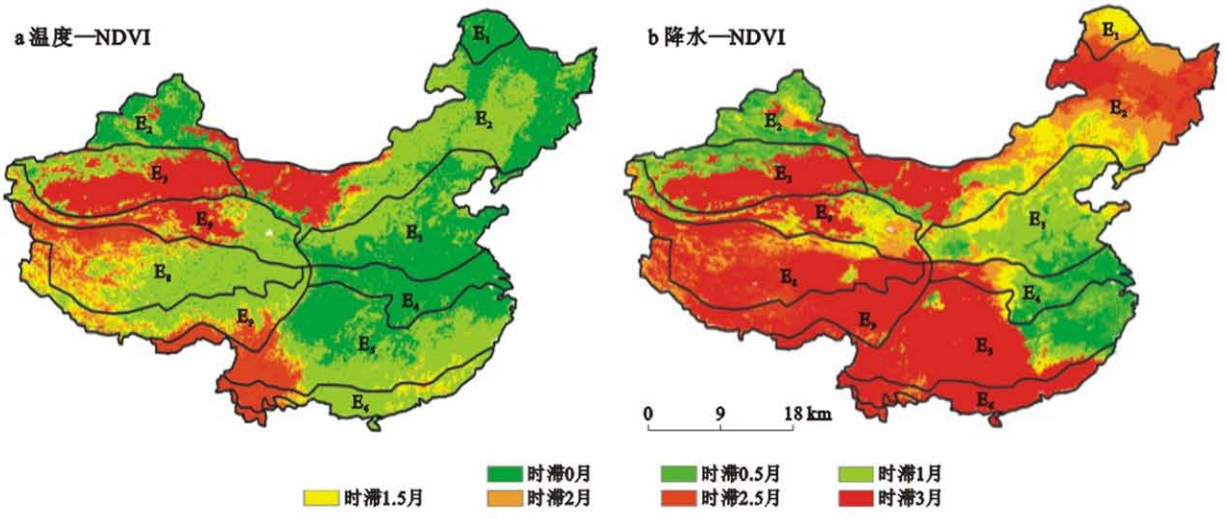
[9] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn[J]. Plant and Soil, 1998,199(2):187-194.
[10] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield[J]. Agronomy Journal, 2000,92(6):1266-1275.
[11] 刘小刚,张富仓,田育丰. 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(7):2025-2032.
[12] Hu Tiantian, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize[J]. Agricutural Water Management, 2009, 96(2):208-214.
[13] 樊小林,李玲,何文勤,等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):131-137.
[14] 刘小刚,张富仓,杨启良,等. 控制性分根区灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(11):62-67.
[15] 柏廷芳,张海,张立新. 氮肥对黄土高原大棚蔬菜及土壤硝酸盐累积的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):555-559.
[16] 谭军利,王林权,王西娜,等. 不同灌水模式对土壤水分和硝态氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报,2008,27(5):29-33.
[17] 陈志杰,张锋,梁银丽,等. 不同灌溉方式对温室嫁接黄瓜根系分布影响的研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):874-877.



附图1　黄土高原南部土壤侵蚀等级空间分布



附图2　河西地区1996—2011年不同天数最大连续降水空间分布



附图3　中国大陆NDVI与温度和降水的时滞空间分布

注：E_1.寒温带；E_2.中温带；E_3.暖温带；E_4.北亚热带；E_5.中亚热带；E_6.南亚热带；E_7.边缘热带；E_8.高原亚寒带；E_9.高原温带