

退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响

——以安塞县为例

梁占岐¹, 李锦荣¹, 郭建英¹, 邢恩德¹, 刘艳萍¹, 珊丹¹, 侯雪彤²

(1. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 磴口县水务局, 内蒙古 磴口 015200)

摘要:以黄土丘陵区退耕还林典型县——安塞县为研究对象,基于3S技术与RUSLE土壤侵蚀模型,从县域尺度上分析评价了黄土高原区退耕还林前后土壤侵蚀变化。研究结果表明:与退耕前1999年相比较,2010年土壤侵蚀强度在空间上发生明显改变,总体上,土壤侵蚀强度有明显减小的趋势。极强烈侵蚀下降幅度最大(下降13.73%),主要向强烈转移,占10.45%;中度侵蚀由35.92%增加到59.98%,主要由强烈侵蚀转移而来,占27.08%;微度和轻度变化较小。土壤侵蚀既有增强区域也有减弱区域,总体趋势以减弱为主。侵蚀加强区域主要是由中度和强烈向强烈、极强烈和剧烈转移,转移面积较小;发生增强的区域主要是以草地覆盖为主;其次是原耕地,退耕还林后转化为林地和草地,部分地区出现裸露斑块,呈现部分小面积土壤侵蚀加剧。土壤侵蚀减弱区域主要是极强烈、剧烈向中度、强烈等转移;转移面积主要发生区域沟壑区低盖度草地、沟道以及河道边缘裸地。随着退耕还林还草工程的实施,荒山林草覆盖度增加,林草植被对降水进行截留下渗,缓减洪峰流量,减少降雨洪峰对沟道和河道侧冲刷,降低土壤侵蚀强度。安塞县实施退耕还林11年后,土壤侵蚀以强度侵蚀为主(46.47%)转中度侵蚀为主(59.98%),全县平均土壤侵蚀由1998年的9780 t/(km²·a)转为2010年的5460 t/(km²·a),每年约减少土壤侵蚀量1274万t。退耕还林工程建设对于安塞县控制水土流失和改善生态环境有着重要作用。研究结果将对该区域水土流失治理提供参考依据。

关键词:退耕还林; 土壤侵蚀; 安塞县; RUSLE

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0077-05

Effects of Returning Farmland to Forest Construction on Soil Erosion

—A Case Study of Ansai County

LIANG Zhanqi¹, LI Jinrong¹, GUO Jianying¹, XING Ende¹,

LIU Yanping¹, SHAN Dan¹, HOU Xuotong²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources,

Hohhot 010020, China; 2. Waterworks Authority of Dengkou County, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: Selecting the typical loess hilly-gully region returning farmland to forest County as the research example, based on 3S technology and the soil erosion RUSLE model, we analyzed and evaluated loess soil erosion change before and after returning farmland to forest loess plateau zones on the county scale. The results showed that compared with the former farmland in 1999, soil erosion intensity obviously changed on the spacial scale in 2010, on the whole, the soil erosion intensity decreased significantly. Extremely strong erosion decreased most (13.73% decline), shift of very strong erosion mainly to strongly accounted for 10.45%. Moderate erosion increased from 35.92% to 59.98%, which was transferred from the strong erosion, accounting for 27.08%. Slight and mild erosion changes were small. The enhanced area and weakened area of soil erosion were observed, and the overall trend of erosion density was declining. The transfer of moderate erosion to strong, and very strong erosion occurred in strengthened erosion area, but transferred area was small; enhanced area was mainly dominated by grassland coverage; the second one was the farmland converted to forestland and grassland, and bare patch appeared in some parts with the increased intensity of soil erosion. The transfer of strong erosion to moderate, and very strong erosion to strong erosion occurred in weakened

收稿日期:2015-05-14

修回日期:2015-06-23

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“中国南方退耕还林工程建设效益评价研究”(201004018)

第一作者:梁占岐(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,高级工程师,主要从事草地水土保持与生态环境保护及草地节水灌溉研究。

E-mail:mkslzq@126.com

通信作者:李锦荣(1980—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,高级工程师,主要从事荒漠化防治及生态遥感研究。E-mail:lijinrong918@126.com

erosion areas. The areas was grassland with low coverage, channel, and bare land of channel gully edge. With the implementation of Grain for Green Project, grass coverage increased in the former barren land, rainfall is trapped by vegetation and infiltrates in soil. Plants play the roles in mitigating peak flow and reducing channel erosion, which makes the soil erosion intensity decrease. After the implementation of 11-year Ansai County Forest, soil erosion intensity changed from the strong erosion (46.47%) to moderate erosion (59.98%), the average soil erosion in the county changed from 9 780 t/(km² · a) in 1998 into 5 460 t/(km² · a) in 2010, the annual reducing soil erosion was 12.74 million t. Returning farmland to forest construction played an important role in the control of soil erosion and improvement of ecological environment. These results will provide reference for soil erosion control in this region.

Keywords: returning farmland to forest; soil erosion; Ansai County; RUSLE

黄土高原的生态环境恶化已成为阻碍当地可持续发展的重大问题,水土流失、土地沙化问题日趋严重。水土流失造成土壤生产力下降、土壤贫瘠、植被覆盖度降低。特别是该地区的陡坡耕地,人为加剧水土流失。国家在 1999 年提出了退耕还林(草)政策,在黄土高原区主要是将大于 25 度的耕地,种植当地乡土树种,进行生态修复。改变土地利用方式,增加地表覆盖度,降低水土流失。土壤侵蚀的发生发展特性与地表植被、土地利用方式息息相关^[1-2]。土地利用方式的改变、植被盖度的增加必将引起一系列的生态过程变化。生态过程对生态环境及其小气候产生积极影响,更进一步促进植被生长。所以,有必要对退耕还林建设工程实施若干年后,黄土高原的水土流失情况展开研究。

本文以全国退耕还林典型县——安塞县为例,利用 TM 遥感影像解译土地利用状况、植被覆盖度和 DEM 数据,在 ArcGIS 地理信息系统的支持下,利用 ULSE 模型,对黄土高原区安塞县退耕还林前后的土地利用、植被覆盖度、坡耕地面积引起的土壤侵蚀强度的变化、安塞县自退耕还林生态建设工程实施以来土壤侵蚀强度变化做定量研究。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

安塞县位于陕西省延安市以北 38 km 处(108°51′36″—109°26′6″E, 36°30′40″—37°19′25″N),北靠榆林市靖边县,东及东南与宝塔区、子长县相连,南接甘泉县,西依志丹县,海拔高度为 997~1 731 m,全县总土地面积 2 950 km²。地貌类型主要为黄土梁涧、梁峁状黄土丘陵和沟谷阶地^[3],沟壑密度为 4.7 万条/km²。境内水土流失严重,全县水土流失面积 2 832 km²,占全县总面积的 96%^[4]。安塞县地处西北内陆黄土高原,属中温带大陆性半干旱季风气候,夏秋多雨,冬季严寒干燥,年平均气温为 8.8℃,最高值为 9.3℃,最低为 8℃,年平均日照时数为 2 395.6

h,无霜期 157 d,降雨主要集中在夏季的 7 月、8 月、9 月,平均降水量 505.3 mm。土壤以黄绵土为主,土壤发育层厚 25~60 cm,pH 值为 7~8.5,呈弱碱性或中碱性,保水保肥性能差,有机质含量不足 1%,土质绵软,结构疏松,遇水后极易崩解。境内植被较差,天然植被破坏殆尽,南部分布有少量天然次生林,森林覆盖率为 17.7%^[5-6]。安塞县 1999 年开始实施退耕还林还草工程,截止 2010 年底,安塞县累计完成退耕还林 77 906.67 hm²,其中退耕地造林 41 040 hm²(农民人均 0.31 hm²),荒山地造林 35 600 hm²,封山育林 1 266.67 hm²。安塞农民人均退耕面积 0.31 hm²,是全国退耕农民人均退耕面积的 2.7 倍。

1.2 ULSE 模型

在土壤水蚀预报方面,ULSE 是比较成熟的数学模型,它具有建模资料易于获取、预报精度较高、应用方便等优点。通用土壤流失方程(USLE)由 Wischmeier 等^[7]于 1958 年提出,为提高各因子计算的通用性,美国农业部又提出了修正方程 RUSLE,模型的数学表达式为:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:A——某地块多年平均降雨径流年土壤流失量(t/hm²);R——年降雨侵蚀力因子[MJ · mm/(hm² · h)];K——土壤可蚀性因子;L——坡长因子,无量纲,反映坡长对土壤流失的影响;S——坡度因子,无量纲,反映坡度对土壤流失的影响;C——植被因子,无量纲,反映农作物、牧草或树木覆盖对土壤流失的影响;P——土壤保持措施因子,无量纲,反映等高耕作等土壤保持措施与顺坡耕作农地小区的土壤流失率的比值。

1.3 R 值计算

R 值是综合反映降雨功能和径流冲刷能的指标,它等于降雨总能量(E)与 30 min 最大雨强的乘积,即 $R=E \cdot I_{30}$,计算时将 1 年内各次降雨的月值相加得出年 R 值,即: $\sum_{i=1}^m E \cdot I_{30}$,m 是一年内的侵蚀降雨次数。目前直接测定和计算十分复杂,因而美国学者

建立了易于观测的降雨强度 I 与 E 的经验公式: $E = 210.2 + 891 \lg I$, 大气降雨过程中, 雨滴对土壤有击溅力, 径流对土壤有冲刷力, 但是只有当降雨达到一定的数量和强度时, 才能形成侵蚀土壤的动力, 即侵蚀降雨。它的大小因地形、土壤、植被等条件的差异而不同, 因此规定, 能够在地面环境较不利的条件下产生明显土壤流失的降雨作为侵蚀降雨标准。不同地区的土壤类型、土质疏松以及质地等都差异很大, 所以不同地区的 R 值计算公式不能通用。据调查分析, 黄土高原地区的水土流失季节为 5—10 月份, 当降雨量 ≥ 10 mm, 最大 30 min 雨强 ≥ 4 mm 时将会引起土壤流失。侵蚀降雨多集中在 7 月、8 月、9 月 3 个月, 占 5—10 月降雨量的 77.1%, 占年降水总量 60.5%。为了简化实际工作中月值的计算过程, 孙保平等^[8]在黄土高原区建立了 5—10 月份降雨量 (h) 与年侵蚀力回归方程: $R = 1.77h - 133.03$ (相关系数 $r = 0.85$) 可供计算时使用。按公式(1)计算, 安塞县 1999 年 $R = 496.6$, 2010 年 $R = 677.9$ 。

1.4 K 值计算

K 因子反映了土壤对侵蚀的敏感性及降水所产生的径流量与径流速率的大小。影响 K 因子的因素很多, 但一般来说主要与土壤的粒径和有机质有关。依据前人的研究, K 值的大小与土壤质地有较高的相关性。Sharpley 等^[9]在 EPIC 模型中, 把土壤可蚀性因子 K 的计算公式发展为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{S_i}{C_1 + S_i} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right) \quad (2)$$

式中: S_a ——砂粒 (0.1~2 mm) 含量百分比; S_i ——粉粒 (0.002~0.1 mm) 含量百分比; C_1 ——黏粒 (< 0.002 mm) 含量百分比; C ——有机碳含量百分含量; S_n ——粉粒和黏粒含量, $S_n = 1 - S_a/100$ 。利用 1:100 万土壤分类图 (数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”<http://westdc.westgis.ac.cn>), 提取所需要的信息计算 K 值。数据库中提供的 T_SAND 砂粒 (0.0625~2 mm), 黏粒 T_CLAY (< 0.002 mm) 和粉粒 T_SILY (0.002~0.0625 mm) 的分类标准不一致, 利用 3 次样条插值法求得 0.1 mm 处的值^[10], 利用公式(2)计算 K 值, 结果见附图 8。

1.5 LS 因子计算

1.5.1 L 坡长因子 利用 DEM 栅格数据和 ArcGIS, 根据公式(3)提取坡长 λ 。利用 L 和坡长的关系求取坡长因子。

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (3)$$

式中: λ ——坡长 (m); m ——坡长效应指数, 当坡度 $< 1\%$ 时, $m = 0.2$; 坡度 $1\% \sim 3\%$, $m = 0.3$; 坡度 $3\% \sim 5\%$, $m = 0.4$; 坡度 $> 5\%$, $m = 0.5$ 。

1.5.2 S 坡度因子 缓坡上选用 McCool 等^[11]研究的坡度公式, 在陡坡上采用 Liu 等^[12]的坡度公式, 见公式(4)。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中: S ——坡度因子; θ ——坡度。

按照上述方法和公式(4), 计算得到安塞县坡长坡度因子 LS (附图 9)。

1.6 C 作物管理及植被盖度因子的确定

植被具有截留降雨、减缓径流、保土固土等生态功能, 对控制土壤侵蚀起着决定性的作用, 山地植被覆盖率的大小直接影响土壤侵蚀程度的强弱。因而, 不管是早期的土壤侵蚀人工普查, 还是近来各种理论下建立的土壤侵蚀量预测模型, 都将植被覆盖度作为衡量地表水土流失程度的一个重要因子。

通用土壤流失量方程 USLE 中, 植被因子 C 与植被类型、植被覆盖度有关, 是根据地表植物覆盖状况不同而反映植被对土壤流失影响的因素, 它是方程诸因子中相对变化范围较大的因子。

1.6.1 植被盖度的提取 植被盖度的计算现在大多数是利用遥感提取植被指数, 利用植被指数与外业调查的植被盖度建立相关关系, 最终得到植被盖度图。而最常用的就是利用植被 NDVI 指数, 来估算植被盖度。

根据安培浚等^[13]在西北干旱区利用 NDVI 所建立的植被指数与植被覆盖度的关系来确定植被覆盖度 c 。利用 NDVI 计算植被覆盖度 c 的公式为:

$$c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (5)$$

式中: $NDVI$ ——所求像元的归一化植被指数; $NDVI_{\min}$, $NDVI_{\max}$ ——研究区 $NDVI$ 的最小值和最大值。

1.6.2 C 因子的确定 C 值主要受植被覆盖度和土地利用现状的制约, 本次研究将参考国内外的研究成果^[13-16], 结合安塞县的实际情况利用公式(6)计算得各地类年均 C 因子。利用 ArcGIS 中的 Raster Calculator, 利用下面公式计算得到 C 因子 (附图 10)。

$$C = \begin{cases} 1 & c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg c & 0 < c \leq 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (6)$$

1.7 P 保护措施因子的确定

P 因子为采用专门措施后的土壤流失量与采用

顺坡种植时的土壤流失量的比值。国内 P 值的获得基本上是根据区域特点对土地的不同利用方式赋值。最终参照刘得俊等^[17]的研究成果,结合我们分类得到的土地利用现状图进行 P 因子赋值。坡耕地在实施退耕还林工程后,农业用地基本上属于等高耕作和梯田,侵蚀量比较大而且没有任何保护措施,坡耕地基本都种植乔木和灌木,部分转化为草地。所以可以据此对不同土地利用下的 P 因子赋值:退耕前林地、高覆盖度草地和低覆盖度草地的均赋值为 1,建

筑用地和水域的赋值为 0,而农田则赋值为 0.30;退耕后考虑到安塞县从 1999 年的退耕还林工程的实施, $>25^{\circ}$ 的坡耕地全部退耕地为林草地,转化之后的有林地和灌木林地均有侵蚀防治措施,有林地和灌木林地进行反坡整地、鱼鳞坑等。所以在 2010 年的土地利用新增有林地和灌木林地的 P 值取 0.8,未变化有林地和灌木林地取 1。退耕后耕地基本是较为平坦的旱地和梯田, P 值取 0.35,其他土地利用类型 P 值退耕还林前后无变化(表 1)。

表 1 退耕还林前后 P 值变化

土地利用	有林地	灌木林地	耕地	高盖度	中盖度	未利用	水域	城乡居民工矿建设用地
退耕前 P 因子值	1	1	0.3	1	1	1	0	0
退耕后 P 因子值	1/0.8	1/0.8	0.35	1	1	1	0	0

注:退耕的有林地、灌木林地 $P=0.8$ 以及剩余的地势较为平坦的耕地和梯田 $P=0.35$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀等级变化

在得到 ULSE 通用方程的因子图后,利用 ArcGIS 栅格计算器,把各因子相乘得到土壤流失数据,按照水利部 LS190—2007 标准将土壤流失进行分级(表 2),得到土壤侵蚀强度。由于其单位为英制,需要进行单位转换,乘以系数 224.2,即可转换为 $t/(km^2 \cdot a)$ 的公制单位,得到各像元的年土壤流失量。

从表 2 可以明显看到,与退耕前 1999 年相比较,2010 年土壤侵蚀强度在空间上发生明显改变,总体上,土壤侵蚀强度有明显减小的趋势。与 1999 年相比较,在实施退耕还林的 11 年后,土壤侵蚀的轻度明显降低,水土流失得到有效改善。剧烈侵蚀面积由 1999 年的 2.75%下降到 0.17%,极强烈侵蚀面积由 14.55%下降到 0.82%,下降了 13.73%,下降幅度最大。强烈侵蚀面积由 46.74%下降到 39.02%。退耕还林工程实施 1 年后,侵蚀强度有了显著降低。从表 2 只能看到单纯面积的变化,想进一步对侵蚀强度动态变化趋势,分析土壤侵蚀强度是如何转移变化的,还需通过转移矩阵方法获得(表 3)。

表 2 安塞县土壤侵蚀强度

侵蚀强度	平均侵蚀模数/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	面积/%	
		1999 年	2010 年
微度	<1000	0	0
轻度	1000~2500	0.03	0.02
中度	2500~5000	35.92	59.98
强烈	5000~8000	46.74	39.02
极强烈	8000~15000	14.55	0.82
剧烈	>150000	2.75	0.17

中度侵蚀 28.82%保持不变,其他分别向强烈、极强烈和剧烈转移,转移面积分别占 6.89%,0.15%,0.05%;从土地利用类型来看,转移面积主要发生在耕地、林地、中盖度草地向中盖度草地和低盖度草地转移。

表 3 安塞县土壤侵蚀强度转移矩阵

侵蚀强度	2010 年					
	微度Ⅰ	轻度Ⅱ	中度Ⅲ	强烈Ⅳ	极强烈Ⅴ	剧烈Ⅵ
1999 年	微度Ⅰ	0	0	0	0	0
	轻度Ⅱ	0	0.02	0	0.01	0
	中度Ⅲ	0	0	28.82	6.89	0.15
	强烈Ⅳ	0	0	27.08	19.32	0.25
	极强烈Ⅴ	0	0	3.8	10.47	0.25
	剧烈Ⅵ	0	0	0.27	2.32	0.16

强烈有 27.08%向中度转移,19.32%保持不变,0.25%向极强烈等级转移,约 0.08%向剧烈转移。强烈侵蚀主要发生在耕地,大部分是坡度较的坡耕地,其中还有部分中低盖度草地,2010 年后 19.32%保持不变,主要土地利用类型为草地;27.08%向中度转移的主要是耕地转变为林地和草地,经过十多年恢复,植被盖度有显著增加,侵蚀等级呈现下降趋势。向极强烈和剧烈转移的面积主要是分布在低盖度草地。可能是退耕还林还草中个别地区在林地和草地中出现裸露地表斑块。

极强烈大部分向强烈转移,占 10.45%;只有 0.25%保持不变,有 3.8%向中度转移,向微度和轻度转移的共约 0.05%,保持侵蚀等级降低趋势。1999 年极强烈侵蚀区主要分布在低盖度草地和部分裸地,从地理位置上分布沟壑深处,随着退耕还林还草工程的实施,封山对植被恢复起到积极作用。

剧烈侵蚀区主要分布在沟道位置以及河流边缘,其中有 0.27%向中度侵蚀转移,2.32%向强烈侵蚀转移,有 0.16%向极强烈转移。这主要是由于退耕还林工程实施,林地和草地对部分降水进行截留下

2.2 土壤侵蚀空间转移变化

从表 3 看,微度、轻度变化不大,大部分还是保持原有侵蚀水平,只有部分侵蚀加剧向更高一级侵蚀转移;

渗,缓减洪峰流量,减少降雨洪峰对沟道和河道侧冲刷,降低土壤侵蚀强度。

安塞县 2010 年的全县平均土壤侵蚀为 $5\,460\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属于强度侵蚀,其研究结果与张岩等^[18]利用中国土壤侵蚀模型(CSLE)对吴起县 2009 年县域平均土壤侵蚀强度的研究结果基本相似,安塞县和吴起县同属于黄土高原区,土壤类型和水土流失现状较为相似,其水土流失模数具有参考价值。

总体来看,安塞县退耕还林前以强度侵蚀为主,占安塞县土地总面积的 46.47%,退耕还林后的 2010 年以中度侵蚀为主,占安塞县土地总面积的 59.98%。由此可见,安塞县退耕还林后水土流失得到了有效遏制,生态建设成果突出,但土壤侵蚀状况仍然较为严重,需要继续加强巩固退耕还林工程建设成果,充分发挥退耕还林工程建设的水土保育效应。

3 结论

安塞县实施退耕还林后 11 年来,水土流失控制效果明显,较高强度土壤侵蚀的土地面积在大幅度减少。实施退耕还林还草工程 11 年后,土壤侵蚀强度发生显著变化。土壤侵蚀既有增强区域也有减弱区域,总体趋势以减弱为主。侵蚀加强区域主要是中度和强烈向强烈、极强烈和剧烈转移,转移面积较小;发生增强的区域主要是以草地覆盖为主;其次是原耕地,退耕还林后转化为林地和草地,部分地区出现裸露斑块,呈现部分小面积土壤侵蚀加剧。土壤侵蚀发生减弱区域主要是极强烈、剧烈向中度、强烈等转移;转移面积主要发生区域沟壑区低盖度草地、沟道以及河道边缘裸地,随着退耕还林还草工程的实施,在荒山造林,封山育林使原有荒山林草覆盖度增加,林草植被对降水进行截留下渗,缓减洪峰流量,减少降雨洪峰对沟道和河道侧冲刷,降低土壤侵蚀强度。

研究区退耕还林 11 年后土壤侵蚀分布以中度侵蚀最多,其面积占安塞县国土总面积的 59.98%,而退耕还林前安塞县土壤侵蚀以强度侵蚀为主,占安塞县国土总面积的 46.47%;安塞县退耕还林 11 年后的全县平均土壤侵蚀为 $5\,460\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,属于强度侵蚀,其退耕还林前 1998 年的平均土壤侵蚀为 $9\,780\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,为退耕还林后的 1.80 倍,每年约减少土壤侵蚀量 1 274 万 t。由此可见,退耕还林工程建设对于安塞县控制水土流失和改善生态环境有着重要作用。

参考文献:

- [1] 张鲁,周跃,张丽彤.国内外土地利用与土壤侵蚀关系的研究现状与展望[J].水土保持研究,2008,15(3):43-48.
- [2] 郭碧云,王光谦,张正峰.内蒙古农牧交错区土地利用/覆被变化及土壤侵蚀:以太仆寺旗为例[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(5):9-16.
- [3] 焦峰,温仲明,石辉,等.黄土高原安塞县土地结构[J].山地学报,2004,22(4):406-410.
- [4] 杜英,杨改河,刘志超等.黄土丘陵区退耕还林(草)生态经济系统的能值分析:以安塞县为例[J].干旱地区农业研究,2008,26(5):189-196.
- [5] 陈源泉,高旺盛.基于农业生态服务价值的农业绿色 GDP 核算:以安塞县为例[J].生态学报,2007,27(1):250-259.
- [6] 董孝斌,高旺盛,严茂超.基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析[J].农业工程学报,2005,21(11):1-6.
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [Z]. Washington D C: US Department of Agricultural Science and Education Administration,1978.
- [8] 孙保平,赵廷宁,齐实. USLE 在西吉县黄土丘陵沟壑区的应用[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原试验区土壤侵蚀和综合治理减沙效益研究专集),1990(2):50-58.
- [9] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation. [J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4):206-207.
- [10] 蔡永明,张科利,李双才.不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J].土壤学报,2003,40(4):511-517
- [11] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the Asae,1987,30(5):1387-1396.
- [12] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.
- [13] 安培浚,刘树林,领耀文,等.植被指数遥感定量研究:以民勤绿洲为例[J].遥感技术与应用,2005,20(6):576-581.
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U. S. [M]. Washington: Science and Education Administration,1987.
- [15] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water conservation[M]. Washington: Science and Education Administration,1965.
- [16] 江忠善,王志强,刘志.黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,1(2):1-9.
- [17] 刘得俊,李润杰,王文卿,等.基于地理信息系统的西宁市土壤侵蚀监测的实现[J].水土保持研究,2006,13(5):111-113.
- [18] 张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.