

基于 GIS 的黄土高原不同植被区土壤侵蚀研究

李 斌¹, 张金屯²

(1.中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051; 2.北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘 要:在对黄土高原植被进行分区的基础上,利用地理信息系统技术和景观生态学方法对黄土高原植被区空间数据和土壤侵蚀空间数据进行了空间叠加分析。结果表明,黄土高原被划分为森林植被区、森林草原植被区、温性草原植被区和荒漠半荒漠植被区。在森林植被区,黄土高原土壤侵蚀主要以水蚀为主,轻度以上的侵蚀百分比为 41.92%,水蚀土壤侵蚀指数比温性草原植被区和荒漠半荒漠植被区的水蚀土壤侵蚀指数大,为 346.90。在森林草原植被区,黄土高原土壤侵蚀主要以水蚀为主,轻度以上的侵蚀百分比为 70.45%,水蚀土壤侵蚀指数均比其他植被区的水蚀土壤侵蚀指数大,为 449.40,水蚀最为严重。在温性草原植被区,黄土高原土壤侵蚀主要以水-风混合侵蚀为主,风蚀微度-水蚀剧烈的百分比最大,为 33.01%,水-风混合侵蚀土壤侵蚀指数均比其他植被区的水-风混合侵蚀土壤侵蚀指数大,为 633.45,水-风混合侵蚀最为严重。在荒漠半荒漠植被区,黄土高原土壤侵蚀主要以风蚀为主,轻度以上的侵蚀百分比为 99.65%,风蚀土壤侵蚀指数均比其他植被区的风蚀土壤侵蚀指数大,为 589.78,风蚀最为严重。黄土高原的土壤侵蚀表现出明显的地带性分异规律。

关键词:黄土高原;地理信息系统;景观生态学方法;植被区;土壤侵蚀

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0134-05

Study on Soil Erosion of Different Vegetation Regions in Loess Plateau Based on GIS

LI Bin¹, ZHANG Jin-tun²

(1.College of Chemical Technology and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2.College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The spatial data of vegetation regions and soil erosion in loess plateau were spatially overlap-analyzed with geographical information system(GIS) technology and landscape ecological methods on the basis of loess plateau vegetation regions classification. For a long time, severe soil erosion has not only produced a great impact on agriculture in this area, but also seriously damaged the ecological system of the Loess Plateau and the near areas. The study shows the crucial factor leading to soil erosion was vegetation. The vegetation region attributes in Loess Plateau were embodied with geographical information system(GIS) technology, two-way indicator species analysis(TWINSPAN) and detrended canonical correspondence analysis(DCCA). The Loess Plateau is classified into four regions, which are forest vegetation region, forest-steppe vegetation region, steppe vegetation region and semi-desert and desert vegetation region. There existed a close relation between the vegetation region and soil erosion in Loess Plateau land-scale. The relationship of the vegetation region and soil erosion in Loess Plateau was discussed by using the spatial overlap statistics of the soil erosion data and vegetation region data based on geographical information system. The results showed that frozen erosion distributes in both forest-steppe vegetation region and steppe vegetation region while water erosion, wind erosion and water-wind erosion distribute in all vegetation regions. In forest vegetation region, water erosion above the light degree accounted for 41.92%, and water erosion index, being 346.90, was bigger than those in the steppe vegetation region and semi-desert and desert vegetation region. In forest-steppe vegetation region, water erosion above the light degree accounted for 70.45%, and water erosion index, being 449.40, was biggest in all the indexes of the vegetation regions, which meant water erosion in the forest-steppe vegetation region was the most severe. In steppe vegetation region, water-wind erosion was main, accounting for 33.01%, and water-wind erosion index, being 633.45, was biggest in all the indexes of the vegetation regions, which meant water-wind erosion in the steppe vegetation region was the most severe. In semi-desert and desert vegetation region, wind erosion above the light degree accounted for 99.65%, and wind erosion index, being 589.78, was bigger than any other index in the rest vegetation regions, which meant wind erosion in the semi-desert and desert vegetation re-

收稿日期:2009-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(30070140);山西省自然科学基金项目(2007011079)

作者简介:李 斌(1972—),男,山西孝义市人,副教授,博士,主要从事环境生态方面的研究。E-mail:libin4y@163.com

gion was the most severe. The distribution of soil erosion in loess plateau was obviously characterized by spatial change, and such results can demonstrate the effectiveness of studying the relationships of the vegetation region and soil erosion with geographical information system and landscape ecological method and provide scientific evidences for the protection, utilization, recovery and reconstruction of Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; geographical information system; landscape ecological methods; vegetation region; soil erosion

当前,土壤侵蚀已成为全球性的公害,严重威胁着人类的生存与发展^[1]。我国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,水土流失面广量大。土壤侵蚀引起的土地退化,使下垫面的性质发生改变,从而导致严重的自然灾害^[2]。黄土高原,位于 100°52′~114°33′E, 33°41′~41°16′N,是世界上黄土分布面积最大、最集中和黄土地貌最典型的地理单元。由于受干旱气候、复杂地形及稀疏植被等因素影响,成为全国水土流失最严重的地区。为了系统理解多种尺度土壤侵蚀过程及其相关的现代地表过程,分析评估全球变化与区域土壤侵蚀关系,必须开展大尺度土壤侵蚀与水土保持格局与规律研究^[2-3]。黄土高原作为景观是一个大尺度的宏观系统,其观测尺度要比生态学其他分支(如生态系统生态学)大得多,大量空间数据的获取、分析和处理是景观尺度研究的重要特征。地理信息系统具有对空间数据的存贮和管理能力,还提供强大的空间分析手段,利用地理信息系统技术和景观生态学方法研究黄土高原景观尺度上不同植被区的土壤侵蚀,满足了现代生态学往往要研究大量的庞杂的空间信息的要求^[4-5]。

许多学者对生态环境最脆弱的黄土高原地区的土壤侵蚀进行了研究。国内学者主要从黄土高原土壤侵蚀与旱地农业角度和黄土高原土壤侵蚀类型及分区去研究,而且多是零星的、小尺度的^[2-3,6-11];国外学者通过试验就黄土高原在坡面、沟坡和沟道不同的地貌部位建立了相应的侵蚀产沙关系式,从沟蚀出发,对沟蚀发生的过程和侵蚀产沙特征进行了深入细致的研究,强调了上方来水对沟道侵蚀的影响,并建立了经验模型对沟蚀过程进行描述^[12-14]。总体来说,关于黄土高原景观尺度水平上不同植被区土壤侵蚀的研究尚未见诸报道。

本文在应用双向指示种分析法(Two-way indicator species analysis, TWINSpan)和除趋势典范对应分析(Detrended canonical correspondence analysis, DCCA)^[5]对黄土高原植被分区的基础上,应用GIS技术和景观生态学方法对黄土高原植被区空间数据和土壤侵蚀空间数据进行了空间叠加分析,揭示出其分布规律及特点,以期对黄土高原地区的土地保护、合理

利用、恢复与重建,为西部大开发提供科学依据。

1 方法

1.1 数据来源

黄土高原植被有 11 个植被型组, 23 个植被型, 171 个群系。这 11 个植被型组分别是针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草原、草甸、荒漠、沼泽、沙生植被、栽培植被、荒漠及高山稀疏植被。将《黄土高原地区植被类型图》(1:500 000)^[15]作为基本分析图件,利用GIS软件MAPGIS将《黄土高原地区植被类型图》数字化输入计算机,根据需要对各类要素进行增、删、编辑,并在特征属性表中增加关键的对应数据项,使空间数据与外部属性库建立起严格一致的关联。依经纬网格将黄土高原分成经度为 30′, 纬度为 30′的小区,面积不足标准小区 50%的边界上的小区合并到相邻的小区中,共得 257 个小区,即为研究的实体,将植被图上各植被类型的实际面积作为实体的属性,利用GIS通过图形量算得到植被数据,这样得到 257×171 的植被数据矩阵。对数据矩阵用双向指示种分析法(Two-way indicator species analysis, TWINSpan)和除趋势典范对应分析(Detrended Canonical Correspondence Analysis, DCCA)^[5]分类和排序,从而对黄土高原植被进行分区,建立黄土高原植被区的空间数据库和属性数据库。

将《黄土高原地区土壤侵蚀类型与强度图》(1:500 000)^[16]作为基本分析图件,利用GIS软件MAPGIS将《黄土高原地区土壤侵蚀类型与强度图》(1:500 000)数字化,根据需要对各类要素进行增、删、编辑,并在特征属性表中增加关键的对应数据项,使空间数据与外部属性库建立起严格一致的关联。利用GIS提取斑块信息,包括水力侵蚀、风力侵蚀、水力-风力侵蚀和冻融侵蚀 4 大侵蚀斑块类型。量算每个斑块的面积以及每个景观组分的总面积,建立黄土高原地区土壤侵蚀空间数据库和属性数据库。

1.2 土壤侵蚀指数

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} A_{ij}$$

式中: T 为土壤侵蚀指数, W_{ij} 为第 i 类第 j 级土壤侵

蚀强度分级值, A_{ij} 为第 i 类第 j 级土壤侵蚀强度面积比重。

土壤侵蚀指数的大小能反映土壤受侵蚀的程度。水力侵蚀强度为微度、轻度、中度、强度、极强与剧烈;水-风混合侵蚀强度为风蚀微度-水蚀微度、轻度、中度、强度、极强与剧烈;风蚀轻度-水蚀微度、轻度、中度、强度、极强与剧烈;风蚀中度-水蚀微度、轻度、中度、强度、极强与剧烈;风蚀强度-水蚀微度、轻度、中度、强度、极强与剧烈;风力侵蚀强度为微度、轻度、中度、强度与极强;冻融侵蚀不分级,不同土壤侵蚀类型的不同强度等级具有不同的分级值^[17-18]。土壤侵蚀指数越大,表明土壤侵蚀越强,反之,则越小。

2 结果与分析

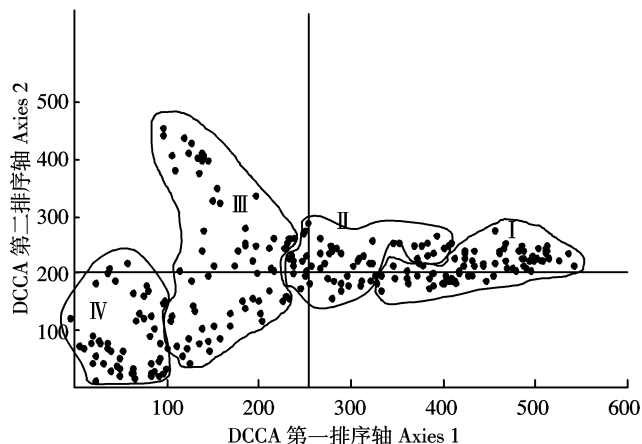
2.1 黄土高原植被区的划分

黄土高原植被地带性在学术界争论颇多:有学者认为黄土高原是干草原地带;也有学者认为黄土高原是荒漠草原地带,历史上植被稀少,水土流失是生来就有的,与人类活动关系不大;还有学者认为黄土高原就是森林地带,等等。现在大多数学者认为黄土高原是森林和草原地带,即黄土高原南部是暖温带森林地带,而中北部是草原地带,二者之间有森林草原过渡带,在北部有较小的荒漠草原区。这一观点得到了许多研究的支持^[19]。

我们应用 TWINSpan 分析对 257 个小区的植被数据矩阵进行分类,同时进行 DCCA 排序,实际上是对黄土高原植被区进行划分^[20]。DCCA 第一排序轴代表黄土高原植被区的纬向性变化。DCCA 第二排序轴代表黄土高原植被区的经向性变化。我们根据 TWINSpan 分类的结果,结合 DCCA 排序,将黄土高原划分为 4 个植被区:Ⅰ:森林植被区;Ⅱ:森林草原植被区;Ⅲ:温性草原植被区;Ⅳ:荒漠半荒漠植被区。选择了指示植被类型和主要的植被类型标示在图 1 上。图 1 从右向左,植被区由森林植被区、森林草原植被区、温性草原植被区过渡到荒漠半荒漠植被区。这也证实了大多数学者黄土高原植被地带性观点的正确性。在此基础上,利用 GIS 软件 MAPGIS 建立黄土高原植被区的空间数据库和属性数据库。

2.2 黄土高原不同植被区的水蚀分析

水蚀是黄土高原地区土壤侵蚀的主要类型。应用 GIS 技术和景观生态学方法,对黄土高原植被区空间数据和土壤侵蚀空间数据进行空间叠加,得到不同植被区类型的水蚀强度百分比及土壤侵蚀指数(表 1)。



Ⅰ:森林植被区;Ⅱ:森林草原植被区;Ⅲ:温性草原植被区;Ⅳ:荒漠半荒漠植被区

图 1 黄土高原主要植被区和植被类型图

Figure 1 Diagram of vegetation regions and vegetation in Loess Plateau

在植被区类型中,水蚀分布于整个黄土高原地区。土壤侵蚀由强到弱依次为森林草原植被区(Ⅱ)、森林植被区(Ⅰ)、温性草原植被区(Ⅲ)和荒漠半荒漠植被区(Ⅳ)。森林草原植被区的土壤侵蚀指数最高达 449.40,而且轻度以上的侵蚀百分比为 70.45%。这说明我国黄土高原地区的森林草原植被区水蚀严重。在森林草原植被区,因长期人为破坏植被、垦荒种田,大部分地区目前植被较少,以草原植被为主。由于降雨增多,特别是夏秋季多暴雨,以及地面起伏较大,土质疏松,加之植被覆盖度低等因素的影响,水蚀强烈。森林植被区的土壤侵蚀指数也达到 346.90,在森林植被区年降雨量在 500~700 mm 以上的地区,植被较好,水蚀相对轻微,年降雨量在 500 mm 左右的地区,水蚀成为主要的侵蚀方式。但总的来说,森林植被区由于植被覆盖较好,水蚀相对轻微。荒漠半荒漠植被区(Ⅳ)的土壤侵蚀指数最小为 71.16,轻度以上的侵蚀

表 1 不同植被区的水蚀强度百分比及土壤侵蚀指数

Table 1 The percentage and soil erosion index of water erosion intensity under different vegetation regions

D	微度/%	轻度/%	中度/%	强度/%	极强/%	剧烈/%	轻度以上/%	T
Ⅰ	58.08	15.74	16.63	7.83	1.72		41.92	346.90
Ⅱ	29.55	6.29	9.79	30.23	12.56	11.58	70.45	449.40
Ⅲ	39.55	15.72	13.58	24.84	5.79	0.52	60.45	316.86
Ⅳ	76.24	13.96	7.78	2.02			23.76	71.16

注:D 为植被区类型;T 为土壤侵蚀指数;微度/%、轻度/%、中度/%、强度/%、极强/%、剧烈/%和轻度以上/%都是指同一植被区水蚀强度的百分比。

百分比为 23.76%,表明荒漠半荒漠植被区水蚀不强。

2.3 黄土高原不同植被区的风蚀分析

应用 GIS 技术和景观生态学方法,对黄土高原植被区空间数据和土壤侵蚀空间数据进行了空间叠加,得到不同植被区类型的风蚀强度百分比及土壤侵蚀指数(表 2)。在土壤风蚀区,荒漠半荒漠植被区(Ⅳ)的土壤侵蚀指数最大,为 589.78,轻度以上的侵蚀百分比为 99.65%,荒漠半荒漠植被区年降雨量基本在 200 mm 左右,气候干旱,风沙活动强烈,是我国土地沙漠化及其危害较为突出的地区,风蚀最为严重。温性草原植被区(Ⅲ)的土壤侵蚀指数也比较大,为 433.01,轻度以上的侵蚀百分比为 99.24%。这表明黄土高原地区的草原区,受到人类的不当利用,草地被破坏或改作他用,草地的侵蚀较严重,由此带来生态环境的恶化,主要分布于黄土高原内蒙中部和青海等地,强烈的风蚀成为塑造地面的主导营力。森林植被区(Ⅰ)的风蚀土壤侵蚀指数最小,为 260.09,轻度以上的侵蚀百分比为 98.25%,这主要是由于森林植被区植被覆盖较好,且平均风速较小。

表 2 不同植被区的风蚀强度百分比及土壤侵蚀指数

Table 2 The percentage and soil erosion index of wind erosion intensity under different vegetation regions

D	微度/%	轻度/%	中度/%	强度/%	极强/%	轻度以上/%	T
I	1.75	65.01	33.24			98.25	260.09
II	1.11	58.17	30.70	10.02		98.89	302.62
III	0.76	5.85	29.54	33.53	30.32	99.24	433.01
IV	0.35	7.49	22.84	35.56	33.76	99.65	589.78

注: D 为植被区类型; T 为土壤侵蚀指数; 微度/%、轻度/%、中度/%、强度/%、极强/%和轻度以上/%都是指同一植被区风蚀强度的百分比。

2.4 黄土高原不同植被区的水-风混合侵蚀分析

应用 GIS 技术和景观生态学方法,对黄土高原植被区空间数据和土壤侵蚀空间数据进行了空间叠加,得到不同植被区类型的水-风混合侵蚀强度百分比及土壤侵蚀指数(表 3)。在土壤水-风混合侵蚀区,温性草原植被区(Ⅲ)的土壤侵蚀指数最大,为 633.45,风蚀微度-水蚀剧烈的百分比最大,为 33.01%。温性草原植被区大部分地区年降雨量在 250~450 mm,雨量不大,但降雨集中,且多暴雨。年内冬、春多大风,是干旱与半干旱的过渡地带。干旱、风沙、洪水、冰雹等自然灾害频繁,气候变化剧烈,生态环境脆弱,水-风混合侵蚀最为严重。森林草原植被区(Ⅱ)的土壤侵蚀指

数也较大,为 486.24。荒漠半荒漠植被区(Ⅳ)的土壤侵蚀指数最小,为 285.21,表明荒漠半荒漠植被区土壤水-风混合侵蚀不强。

表 3 不同植被区的水-风混合侵蚀强度百分比及土壤侵蚀指数

Table 3 The percentage and soil erosion index of water-wind erosion intensity under different vegetation regions

D	微度/%	轻度/%	中度/%	强度/%	极强/%	剧烈/%	T
I W ₁	17.00	39.26					309.56
I W ₂	12.36	2.16					
I W ₃	28.92						
I W ₄							
II W ₁	12.76	22.24	3.08	5.18			486.24
II W ₂	18.96	1.57	2.46	3.98			
II W ₃	28.38	1.39					
II W ₄							
III W ₁	6.76	0.95	0.19	10.25	16.71	33.01	633.45
III W ₂	3.53	0.14	1.46	2.36	4.55	3.98	
III W ₃	11.91	0.75	1.53	0.85	0.35		
III W ₄	0.65	0.07					
IV W ₁	25.41	9.17	1.23	0.12			285.21
IV W ₂	42.47	1.83	0.03	0.15			
IV W ₃	17.96	0.12	1.34				
IV W ₄	0.17						

注: D 为植被区类型; T 为土壤侵蚀指数; W₁、W₂、W₃ and W₄ 分别指风蚀微度、风蚀轻度、风蚀中度和风蚀强度; 微度、轻度、中度、强度、极强和剧烈都是指水蚀; 微度/%、轻度/%、中度/%、强度/%、极强/%、剧烈/%和轻度以上/%都是指同一植被区水-风混合侵蚀强度的百分比。

2.5 黄土高原不同植被区的冻融侵蚀分析

黄土高原冻融侵蚀面积较小,森林草原植被区(Ⅱ)的冻融侵蚀面积为 $7.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。温性草原植被区(Ⅲ)的冻融侵蚀面积为 $2.85 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。冻融侵蚀主要分布在青海东部的冷龙岭、大板山、拉脊山及黄河以南的高山地区。

3 结论与讨论

应用 TWINSpan 和 DCCA 对黄土高原 257 个小区的植被数据矩阵进行划分,黄土高原被划分为森林植被区、森林草原植被区、温性草原植被区和荒漠半荒漠植被区。水蚀、风蚀和水-风混合侵蚀在各植被区均有分布。冻融侵蚀只分布在森林草原植被区和温性草原植被区。在森林草原植被区,因长期人为破坏植被、垦荒种田,大部分地区目前植被较少,以草原植被为主。由于降雨增多、植被覆盖度低等因素的影响,水蚀最为严重。荒漠半荒漠植被区年降雨量较少,气候

干旱,风沙活动强烈,风蚀最为严重。处于干旱与半干旱的过渡地带的温性草原植被区雨量不大,但由于降雨集中,而且年内冬、春多大风,气候变化剧烈,生态环境脆弱,水-风混合侵蚀最为严重。

黄土高原地区具大陆性气候,从东南向西北,依次为湿润半湿润暖温带、半湿润半干旱温带、干旱半干旱温带气候区。黄土高原地区的植被在气候、地貌等因素共同作用下,自东南向西北,从湿润的森林植被区过渡到干旱的荒漠半荒漠植被区。从本文分析可以看出,黄土高原地区的土壤侵蚀在气候、地貌、地表组成物质的抗蚀性、植被状况和人为活动影响等因素共同作用下,也具有明显的地带性分异规律。自东南向西北,从暖温带湿润半湿润森林水力侵蚀带、暖温带半干旱森林草原水力侵蚀带、暖温带半干旱草原水力-风力侵蚀带过渡到中温带干旱半干旱荒漠半荒漠风力侵蚀带。黄土高原的土壤侵蚀表现出明显的地带性分异规律。

参考文献:

- [1] CSAR. Erosion hazard assessment[A]//Second land resource evaluation and planning project(LREP-II)[C]. Bogor, Indonesia, 1995:7-12.
- [2] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J].自然杂志,2008,30(1):12-16.
ZHENG Fen-li, WANG Zhan-li, Yang Qin-ke. The retrospection and prospect on soil erosion research in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(1):12-16.
- [3] 李国英.深入研究黄土高原土壤侵蚀规律[J].中国水土保持,2006,10:1-5.
LI Guo-ying. Thorough study on regular pattern of soil erosion of the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006, 10:1-5.
- [4] 李 斌,张金屯.黄土高原地区植被生态信息系统研究[J].环境科学与技术,2004,27(1):48-50.
LI Bin, ZHANG Jin-tun. Application of GIS to development of information system for vegetation ecology in Loess Plateau [J]. *Environmental Science Technology*, 2004, 27(1):48-50.
- [5] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2004.
ZHANG Jin-tun. Quantitative methods in ecology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] 刘世梁,傅伯杰.景观生态学原理在土壤学中的应用[J].水土保持学报,2001,15(3):102-106.
LIU Shi-liang, FU Bo-jie. Application of landscape ecology principle in soil science[J]. *Journal of Soil and Water*, 2001, 15(3):102-106.
- [7] 李智广,曹 炜,刘秉正,等.我国水土流失状况与发展趋势研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.
LI Zhi-guang, CAO Wei, LIU Bin-zheng. Current status and developing trend of soil erosion in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1):57-62.
- [8] 李占斌,朱冰冰,李 鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展 [J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
LI Zhan-bin, ZHU Bing-bing, LI Peng. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):802-809.
- [9] 席承藩,程云生,黄直立.陕北绥德韭园沟土壤侵蚀情况及水土保持办法[J].土壤学报,1953,2(3):148-166.
Xi Cheng-fan, Cheng Yun-sheng, Huang Zhi-li. Soil erosion situation and soil and water conservation measures in Jiuyuan gully of Suide, Shaanxi Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1953, 2(3):148-166.
- [10] 罗来兴,祈延年.陕北无定河、清涧河黄土区域的侵蚀地形与侵蚀量[J].地理学报,1955,21(1):35-44.
LUO Lai-xing, QI Yan-nian. The erosional landform and erosional amounts of the loess region in Wuding River and Qingjian River in Northern Shaanxi[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1955, 21(1):35-44.
- [11] 黄秉维.陕西黄土区域土壤侵蚀的因素和方式[J].科学通报,1958(9):53-59.
HUANG Bing-wei. The factors and patterns of soil erosion in the loess-region in Shaanxi[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1958(9):53-59.
- [12] Hessel R, van Asch T. Modeling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2003, 54:131-146.
- [13] Torri D, Borselli L. Equation for high-rate gully erosion[J]. *Catena*, 2003, 50:449-467.
- [14] Harvey A M. Coupling between hill slopes and channels in up-land fluvial systems: Implications for landscape sensitivity, illustrated from the How gill Fells, northwest England[J]. *Catena*, 2001, 42:225-250.
- [15] 中国科学院植物研究所.黄土高原地区植被类型图(1:500 000)[M].北京:地震出版社,1991.
Institute of Botany, CAS. Vegetation map of the Loess Plateau(1:500 000)[M]. Beijing: Earthquake Press, 1991.
- [16] 中国科学院-水利部西北水土保持研究所.黄土高原地区土壤侵蚀类型与强度图(1:500 000)[M].北京:地震出版社.1991.
Northwestern Institute of Soil and Water Conservation. Soil erosion map of the Loess Plateau(1:500 000)[M]. Beijing: Earthquake Press, 1991.
- [17] 水利电力部.关于土壤侵蚀类型区划分和强度分级标准的规定(试行)[J].中国水土保持,1984,4(10):17-19.
- [18] SL 190—1996,中华人民共和国水利部土壤侵蚀分类分级标准[S].
- [19] 张金屯.黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题[J].水土保持学报,2004,18(5):120-124.
ZHANG Jin-tun. Theory and techniques of vegetation restoration and construction on Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soil and Water*, 2004, 18(5):120-124.
- [20] 李 斌,张金屯.黄土高原植被与气候关系研究 [J].生态学报,2003,23(1):82-89.
LI Bin, ZHANG Jin-tun. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2003, 23(1):82-89.