基于 RS 和 GIS 的江苏省水土流失重点预防区和治理区定量监测

李 盟[1], 方 瑞[1], 乐 峰[1], 吴 芳[1], 张 雪[2]

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水土保持生态环境监测总站, 江苏 南京 210012)

摘 要: [目的] 对江苏省水土流失重点治理区和预防区代表县进行水土流失定量监测,以掌握该区水土流失情况,为该区水土流失动态监测提供技术方法和理论支持。[方法] 收集江苏省徐州市铜山区和连云港市赣榆区 2015 年度高分一号遥感影像、DEM 和降雨量,以中国土壤流失方程(CSLE)为基本算法。[结果] 铜山区水土流失面积1 917.82 km^2,轻度以上流失面积 175.76 km^2,占总流失面积的 9.16%;赣榆区水土流失面积 1 511.2 km^2,轻度以上流失面积 131.95 km^2,占总流失面积的 8.73%。[结论] 本研究方法模型参数真实、客观,不受人为因素干扰,适合多期、大尺度水土流失动态监测,能为江苏省水土流失动态监测提供高效可行的技术方法。

关键词: 遥感; 地理信息系统; 水土流失; 定量监测

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0228-06 **中图分类号**: S157

文献参数: 李盟, 方瑞, 乐峰, 等. 基于 RS 和 GIS 的江苏省水土流失重点预防区和治理区定量监测[J]. 水土保持通报,2018,38(4):228-233. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.037. Li Meng, Fang Rui, Le Feng, et al. Quantitative monitoring of soil and water loss in key control and prevention areas of Jiangsu Province Based on RS and GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):228-233.

Quantitative Monitoring of Soil and Water Loss in Key Control and Prevention Areas of Jiangsu Province Based on RS and GIS

LI Meng[1], FANG Rui[1], LE Feng[1], WU Fang[1], ZHANG Xue[2]

(1. *Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Nanjing* 210029, *Jiangsu, China*;
2. *Soil and Water Conservation Monitoring Station of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu* 210012, *China*)

Abstract: [Objective] Quantitative monitoring of soil and water loss in representative districts of soil and water loss in key control and prevention areas was conducted to grasp the relative conditions of soil and water loss, and to provide technical methods and theoretical support for dynamic monitoring of soil erosion. [Methods] High-resolution remote sensing images, DEM and rainfall data in Tongshan District of Xuzhou City and Ganyu District of Lianyungang City in Jiangsu Province were collected. And Chinese soil erosion equation (CSLE) was used as the basic algorithm to calculate the potential losses of soil and water. [Results] The area of soil erosion in Tongshan district was 1 917.82 km^2, mild loss area and above was 175.76 km^2, accounting for 9.16% of the total loss area. The area of soil erosion in Ganyu district was 1 511.2 km^2, mild loss area and above is 131.95 km^2, accounting for 8.73% of the total loss area. [Conclusion] The model parameters of the research are real and objective, and are not interfered by human factors. It is suitable for multi-period and/or large-scale dynamic monitoring of soil erosion, and will provide an efficient and feasible method for the dynamic monitoring of soil erosion in Jiangsu Province in the future.

Keywords: RS; GIS; soil and water loss; quantitative monitoring

水土流失是指在水力、风力、重力及冻融等自然营力和人类活动作用下,水土资源和土地生产能力的破坏和损失。长期以来,水土流失都是中国面临的头号生态问题,所以水土保持也是中国一贯坚持的基本国策之一。水土流失监测工作可以快速、准确提供土壤侵蚀强度、水土流失分布状况以及动态变化情况,也可为水土流失治理提供必要的科学依据和基础数据支撑,随着遥感和地理信息系统技术的迅速发展和

收稿日期:2018-01-10 **修回日期**:2018-02-22
资助项目:江苏省 2015 年度财政项目
第一作者:李盟(1985—),男(汉族),江苏省南京市人,硕士,主要从事水土流失监测工作。E-mail:1596148755@qq.com。

广泛应用,水土流失监测的手段也开始从传统的地面观测转向遥感监测,因其宏观性、时效性强,且以一定间隔重复的特点,逐渐成为区域尺度下水土流失定量动态监测的核心手段。基于 RS 和 GIS 的水土流失定量监测,就是将 RS 和 GIS 相结合,利用航空、卫星、无人机获得区域内的土地利用、植被覆盖和水土保持工程措施实施情况,另外再计算坡度坡长因子、降雨因子和土壤可蚀性因子,结合 CSLE 方程逐个计算出各像元的水土流失量,最终获得区域内的流失总量。本研究以 RS 和 GIS 技术为支撑,结合中国土壤流失方程 CSLE,选择徐州市铜山区和连云港市赣榆区作为研究区,利用 2015 年度高分 1 号遥感影像,首次对江苏省省级水土流失重点预防区和重点治理区(简称"两区")代表区县进行了水土流失定量监测,以期能为水土流失动态监测提供技术方法和理论支持。

1　研究区概况

1.1　徐州市铜山区

徐州市铜山区位于江苏省西北部,地处东经 116°43′—117°42′,北纬 34°01′—34°35′(图 1),北部与山东省微山县、枣庄市为邻,南部与西南部接安徽省宿州市、灵璧县、萧县,东部与徐州市邳州市、睢宁县交界,西北部与徐州市丰县、沛县毗邻,该区东西长 64.5 km,南北长 61.5 km。区内年平均气温 13.9 ℃,全年平均日照时数约 2 300 h,年平均无霜期约 210 d,年平均降水量 832 mm,全年以偏东风为主,平均风速 2.7 m/s 左右,土壤最大冻结深度为 0.3 m。区内西北部、东南部系废黄河堤下冲积平原,地势平坦、河道纵横、田园平整,自西向东缓倾。东北、西南和东南部分地区为丘陵地区,分布有 700 余座山头,属鲁中南沂蒙山区南缘的剥蚀残丘,海拔高程 50～200 m,平均坡度小于 9°,山体矮小、高低不平、不成山脉。京杭大运河横贯区境北部,废黄河自西而东穿越区境,构成"三片平原三片山,黄河故道一高滩"的地貌特征。铜山区属铜邳低山岗地农田防护土壤保持区,区内何桥镇、黄集镇、郑集镇、马坡镇、刘集镇、柳新镇、单集镇、房村镇、铜山街道、大彭镇、拾屯街道属于江苏省省级水土流失重点预防区,汉王镇、三堡街道、伊庄镇、徐庄镇、茅村镇、柳泉镇、利国街道、利国镇、新区街道、张集镇属于江苏省省级水土流失重点治理区[1]。

1.2　连云港市赣榆区

连云港市赣榆区地处江苏山东两省交界,中心地理坐标为东经 119°18′,北纬 34°50′(图 2),东滨黄海的海州湾,北临山东省日照市,西靠山东省临沂市,南接连云港市区和东海县。赣榆区属暖温带半润湿季风气候区,夏季盛行偏南风,气候炎热多雨;冬季带有大陆性气候特征,盛行偏北风,气候寒冷干燥。区内多年平均气温 13.9 ℃,多年平均降水量 913.70 mm,多年平均风速 2.8 m/s,历年最大冻土深度 31 cm,最大积雪深度 19 cm。区内地形由西北向东南倾斜,依次为山岭、平原和沿海,各占全区总面积的 1/3 左右。低山丘陵海拔主要在 10～400 m 左右,山体单薄,山坡坡度在 20～35°左右,沿海海积平原高程 0.5～3 m,低山和海积平原之间的过渡带为陇岗洼地和河湖堆积平原。赣榆区属连云港低山丘陵土壤保持农田防护区,区内沙河镇、城头镇、柘汪镇属于江苏省省级水土流失重点预防区,班庄镇、黑林镇、石桥镇、金山镇、塔山镇、厉庄镇属于江苏省省级水土流失重点治理区[1]。



图 1　徐州市铜山区水土流失分区



图 2　连云港市赣榆区水土流失分区

2　数据来源及调查方法

2.1　数据准备

本研究采用由水利部水土保持监测中心提供的

2015 年度高分 1 号遥感影像(2 m 分辨率)作为主要遥感数据,采用 Landsat-8OLI 遥感影像(30 m 分辨率)作为辅助遥感数据以补充不足。数字高程模型(DEM)、行政界线、历年降雨资料由江苏省水利网络数据中心提供,其中 DEM 为 1∶1 万标准分幅,tif 格式;行政界线采用 shp 格式;降雨资料选择区域内代表雨量站,时间区间为 1978—2014 年。

2.2 调查方法

2.2.1 遥感解译 本研究对铜山区和赣榆区的总国土面积以 4%的密度抽样,获取了 133 个调查单元,范围是 1 km×1 km 的方格。在建立解译标志的基础上,利用 GIS 采用人机交互解译判读方法对调查单元进行遥感解译,根据《土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007)》对调查单元的土地利用情况进行分析。

2.2.2 野外复核 遥感解译工作完成后,在自查、互查的基础上,开展解译成果实地野外复核工作。野外验证采用抽样调查的方法进行,并在空间上均匀分布,解译结果抽取不少于总面积的 5%进行核查,对核查对象 5%~10%的样本进行实地验证,最终确定每个调查单元各地块的具体信息,包括土地利用类型、水土保持措施等。

3 水土流失量计算

3.1 数学模型

本研究结合第一次全国水利普查水土保持情况调查的技术要求,采用中国土壤流失方程(CSLE)来计算土壤侵蚀模数。

$$A=R\cdot K\cdot LS\cdot B\cdot E\cdot T \tag{1}$$

式中:A——土壤侵蚀模数〔t/(hm^2 · A)〕;R——降雨侵蚀力因子〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;k——土壤可蚀性因子〔t · hm^2 · h/(hm^2 · MJ · mm)〕;L——坡长因子(无量纲);S——坡度因子(无量纲);B——植被盖度与植物措施因子(无量纲);E——工程措施因子(无量纲);T——耕作措施因子(无量纲)。

3.2 水土流失影响因子提取

3.2.1 降雨侵蚀力因子 R 降雨主要由降雨量、平均降雨强度、降雨历时等特征值来反映。降雨侵蚀力因子 R 是一项评价降雨引起的土壤分离和搬运的动力指标,受降雨量、降雨强度的综合影响,反映了降雨对土壤侵蚀的潜在能力[2]。本研究降雨量资料较为充分,故首先计算 2015 年各降雨观测站点全年 24 个半月降雨侵蚀力平均值及各降雨观测站点降雨侵蚀力多年平均值,再利用克里金插值法进行空间插值,得出铜山区和赣榆区降雨侵蚀力空间分布。

$$\overline{R_k}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=0}^{m}(\alpha\cdot P_{i,j,k}^{1.726\,5}) \tag{2}$$

$$\bar{R}=\sum_{k=1}^{24}\overline{R_k} \tag{3}$$

式中:$\overline{R_k}$——第 k 个半月的降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;i——年份序列,取 1,2,…,N;m——第 i 年第 k 个半月大于 12 mm 降雨量的降雨日数;$P_{i,j,k}$——第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性降雨日的降雨量(mm);α——参数,5—9 月取 0.393 7 月,10 月至次年 4 月取 0.310 1;$\bar{R}$——多年平均降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h · a)〕;k——年份序列,取 1,2,…,24。

3.2.2 土壤可蚀性因子 K 土壤可蚀性因子 K 是一项评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标[3],主要由土壤的机械组成、粒级含量、有机质含量、土壤结构级别和土壤渗透级别等土壤性状决定[4],反映了土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感性,是影响土壤侵蚀的内在因素。本研究直接采用第一次全国水利普查水土保持情况调查计算的铜山区和赣榆区土壤可蚀性因子值[5]。

3.2.3 地形因子 LS 地形地貌特征对土壤侵蚀的影响集中表现在坡长和坡度两方面,因此,一般用坡长(L)和坡度(S)因子估算地形因素对土壤侵蚀的影响[2]。LS 因子表示的是,在其他条件相同的情况下,某一特定坡长(L)和坡度(S)的坡面上土壤流失量与标准径流小区典型坡面上土壤流失量的比值[6]。

本研究利用铜山区和赣榆区 1∶1 万 DEM,根据 RUSLE 的改进坡长和坡度因子算式[7-8],提取计算 LS 因子。

$$L=(\lambda/22.13)^m \tag{4}$$

式中:L——坡长因子(无量纲);22.13——标准小区坡长(m);m——坡长指数,其取值为

$$\begin{cases}0.2 & (\theta\leqslant 1^\circ)\\ 0.3 & (1^\circ<\theta\leqslant 3^\circ)\\ 0.4 & (3^\circ<\theta\leqslant 5^\circ)\\ 0.5 & (\theta>5^\circ)\end{cases};$$

θ——坡度角(°);λ——水平坡长(m)。

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & (\theta<5^\circ)\\ 16.8\sin\theta-0.5 & (5^\circ<\theta<10^\circ)\\ 21.9\sin\theta-0.96 & (\theta\geqslant 10^\circ)\end{cases} \tag{5}$$

式中:S——坡度因子(无量纲);θ——坡度角(°)。

3.2.4 植被盖度与植物措施因子 B 本研究主要运用两种方式,即不同土地利用类型直接赋值和遥感提取技术,来获取铜山区和赣榆区的植被盖度与植物措施因子 B 值。

(1) 不同土地利用类型赋值。依据第一次全国水利普查水土保持情况调查研究成果及相关文献资料,若调查单元土地利用类型为耕地、住宅用地、工矿仓储用地、交通运输用地、水域及水利设施用地和其他土地,在调查不同土地利用类型水土保持植物措施的前提下,可直接通过表 1 给 B 因子赋值。

表 1　不同土地利用类型 *B* 因子赋值

序号	土地利用类型	植物措施	B 因子值	赋值依据
1	耕地(水田)	人工乔木林(农田防护林)	0.8	第一次全国水利普查水土保持情况调查《江苏省水力侵蚀野外调查单元成果》
		无	1.0	
2	耕地(水浇地)	人工乔木林(农田防护林)	0.8	
		无	1.0	
3	耕地(旱地)	人工乔木林(农田防护林)	0.8	
		无	1.0	
4	住宅用地(城镇住宅用地)	种草	0.063	参考文献[9—11]
5	住宅用地(农村宅基地)	种草	0.063	参考文献[9—11]
6	工矿仓储用地(采矿用地)	无	1.0	第一次全国水利普查水土保持情况调查《江苏省水力侵蚀野外调查单元成果》
7	工矿仓储用地(工业用地)	种草	0.063	文献资料[9—11]
8	交通运输用地	种草	0.063	
9	水域及水利设施用地	种草	0.063	

(2) 遥感提取。若调查单元土地利用类型为园地、林地和草地,则依托遥感影像数据,采用归一化植被指数(NDVI)进行植被盖度的提取计算。

$$\mathrm{NDVI}=(\mathrm{NIR}-R)/(\mathrm{NIR}+R) \tag{6}$$

式中:NDVI——植被覆盖指数(无量纲);NIR——近红外波段;R——红外波段。通过公式变换得出如下公式:

$$f_c=(\mathrm{NDVI}-\mathrm{NDVI}_{soil})/(\mathrm{NDVI}_{veg}-\mathrm{NDVI}_{soil}) \tag{7}$$

式中:f_c——植被盖度(%);NDVI_{soil}——裸露地表或无植被覆盖象元的 NDVI 值(无量纲);NDVI_{veg}——完全被植被覆盖象元的 NDVI 值(无量纲)。

最终得出 B 因子计算公式:

$$B=\begin{cases}1 & (f_c=0)\\ 0.650\ 8-0.343\ 6\lg f_c & (0<f_c<78.3\%)\\ 0 & (f_c>0)\end{cases} \tag{8}$$

式中:B——植被盖度与植物措施因子(无量纲);f_c——植被盖度(%)。

3.2.5　*工程措施因子 E*　本研究主要参考第一次全国水利普查水土保持情况调查研究成果及相关文献资料,在调查不同土地利用类型水土保持工程措施的前提下,直接给工程措施因子 E 赋值(表 2)。

表 2　不同土地利用类型 *E* 因子赋值

序号	土地利用类型	工程措施	E 因子值	赋值依据
1	耕 地	土坎/石坎水平梯田	0.095	参考文献[12-14]
		水田	0.095	
2	工矿仓储用地	工矿工程	0.1	第一次全国水利普查水土保持情况调查《江苏省水力侵蚀野外调查单元成果》
3	住宅用地(城镇住宅用地)	城镇工程	0.1	
4	住宅用地(农村宅基地)	农村工程	0.2	
5	商服用地	城镇工程	0.1	
6	公共管理与公共服务用地	城镇工程	0.1	
7	交通运输用地	护 坡	0.2	
8	水域及水利设施用地	建设工程	1.0	
9	其他土地	无	1.0	

3.2.6　*耕作措施因子 T*　耕作措施因子 T 是指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[15]。

通常包含于这一因子中的专门措施有:等高耕作、等高带状种植、轮作、间作与套种等,这些措施可以有效提高土壤的抗蚀能力。本研究主要参考第一次全国水利普查水土保持情况调查研究成果,对不同的耕作措施因子 T 直接赋值(表 3)。

表3 不同土地利用类型 T 因子赋值

序号	耕作措施	T 因子值	赋值依据
1	等高耕作	0.4	第一次全国水利普查水土保持情况调查《江苏省水力侵蚀野外调查单元成果》
2	轮作	0.4	
3	间作与套种	0.4	
4	无	1.0	

4 结果分析

4.1 水土流失现状

通过计算，首先获取133个调查单元的7个水土流失影响因子值，再根据铜山区和赣榆区全区不同土地利用类型的面积，采用面积加权计算出不同土地利用类型的7个因子平均值，进而计算出各调查单元的土壤侵蚀模数，再根据土壤侵蚀强度分类分级标准，获取各单元的土壤侵蚀强度，最后通过面积加权的方式得到铜山区和赣榆区水土流失面积和强度情况。截止到2015年，铜山区和赣榆区水土流失现状详见表4。由表4可知，根据计算结果，铜山区水土流失面积1 917.82 km^2，轻度以上流失面积175.76 km^2，占总流失面积的9.16%；赣榆区水土流失面积1511.2 km^2，轻度以上流失面积131.95 km^2，占总流失面积的8.73%。从纵向角度相比，铜山区和赣榆区的水土流失情况均以微度侵蚀为主，流失面积远高于其他侵蚀强度，水土流失待治理面积仅分别占该区流失面积的9.16%和8.73%；从横向角度相比，铜山区除轻度、中度流失面积略低于赣榆区以外，其他强度水土流失面积均明显高于赣榆区，水土流失总面积也高出406.62 km^2。近几年来，铜山区境内开发力度较大，大批生产建设项目上马开工，对原地貌扰动较为剧烈，加之丘陵岗地的地貌特性，造成了当前铜山区的水土流失状况。

表4 代表县区水土流失现状 km^2

县区名	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	合计
铜山区	1 742.06	81.86	20.76	19.08	24.35	29.71	1 917.82
赣榆区	1 379.25	97.10	21.78	4.59	5.28	3.20	1 511.20

4.2 水土流失动态变化情况

铜山区和赣榆区2011年水利普查与2015年本研究调查水土流失动态变化情况对比详见表5。可以看出，铜山区2011—2015年共减少轻度以上水土流失面积为30.73 km^2，除极强烈和剧烈的侵蚀面积有较大幅度增加外，轻度、中度、强烈均有明显下降。

近年来，铜山区水土流失治理力度较大，实施了蔡丘小流域等综合治理工程，同时还专门成立了水土保持监督机构，针对生产建设项目水土保持开展监督执法，这一系列工作对改善铜山区的水土流失起到了积极作用。同时也要看到，极强烈和剧烈侵蚀的面积增加较多，尽管有可能是因为本研究方法调查单元图斑上图面积变小，突出了侵蚀程度较严重的调查单元所致，但在待治理水土流失面积中所占比例也达到了30.8%，所以相关工作仍需进一步加强。赣榆区2011—2015年共减少轻度以上水土流失面积30.75 km^2，除轻度、剧烈侵蚀面积略有增加外，其他侵蚀强度均有不同程度的减少，其中强烈侵蚀面积减少最多，达到28.16 km^2；轻度侵蚀在待治理水土流失面积中所占比例最大，达到73.6%。2013—2015年，赣榆区连续3 a分别实施了青口河小流域、芦山小流域和泊船山小流域水土保持综合治理项目，对缓解当地水土流失、改善生态环境有着积极地推动作用。

表5 代表县区2011与2015年水土流失情况对比 km^2

县区名	年份	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	合计
铜山区	2011	128.69	37.75	29.98	9.43	0.64	206.49
	2015	81.86	20.76	19.08	24.35	29.71	175.76
赣榆区	2011	92.76	24.66	32.75	9.97	2.56	162.70
	2015	97.10	21.78	4.59	5.28	3.20	131.95

5 结 论

本研究以中国土壤流失方程(CSLE)为基础，利用ArcGIS软件，结合遥感影像和DEM数据，分析了江苏省省级水土流失重点预防区和重点治理区代表县徐州市铜山区和连云港市赣榆区的水土流失时间和空间变化，进行了水土流失定量监测。与2011年开展的全国第一次水利普查水土保持情况调查所采

用的技术方法相比:①本研究运用遥感监测加调查单元野外复核的方法,以高分辨率遥感影像为信息源,来确定调查单元的土地利用状况和水土保持措施;水利普查直接采用人工野外调查的方法划分图斑。前者消除了后者的人工误差,在工作精度上得到了提高。②本研究选择了 4%的调查单元抽样密度,高于水利普查 1%的密度,基本覆盖了铜山区和赣榆区的全部行政区域,更加具有代表性,也提高了插值计算结果的可靠性。③本研究调查单元图斑的上图面积(1 000 m^2)要小于水利普查,避免了某一调查单元中小图斑被大图斑合并的状况。今后,该研究方法通过进一步优化因子取值和土壤流失方程参数选取,能为江苏省水土流失动态监测提供高效可行的技术方法。

[参 考 文 献]

[1] 江苏省水利厅.关于发布江苏省省级水土流失重点预防区和重点治理区的公告(苏水农〔2014〕48 号)[R].江苏南京:江苏省水利厅,2014.

[2] 李晓松,姬翠翠,曾源,等.基于遥感和 GIS 的水土流失动态监测:以河北省赤城县为例[J].生态学杂志,2009,28(9):1723-1729.

[3] 刘耀林,罗志军.基于 GIS 的小流域水土流失遥感定量监测研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(1):35-38.

[4] 周斌,杨柏林,洪业汤,等.基于 GIS 的岩溶地区水土流失遥感定量监测研究:以贵州省(原)安顺市为例[J].矿物学报,2000,20(1):13-21.

[5] 叶健.江苏省第一次全国水利普查成果汇编[M].江苏南京:河海大学出版社,2015.

[6] Renard K G. RUSLE Agricultural Manual NR. 703: Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. USA Springfield: United States Department of Agriculture, 1992.

[7] McCool D K. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1388-1396.

[8] Wischmeier W H, Smith D D. Agriculture Handbook No. 537: Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning with the Universal Soil Loss Equation(USLE)[M]. USA Springfield: United States Department of Agriculture, 1978.

[9] 符素华,吴敬东,段淑怀,等.北京密云石匣小流域水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2001,15(2):21-24.

[10] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J].应用生态学报,2002,13(8):1033-1036.

[11] 林杰,张金池,顾哲衍,等.基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J].林业科学,2013,49(2):86-92.

[12] 李叶鹏.对水土保持措施及其减水减沙效益分析[J].中国房地产业,2015(S2):114.

[13] 朱虹,唐婷婷,蔡艳蓉.土壤侵蚀预报模型中的水土保持措施因子研究进展[J].科技展望,2015(21): 222-224.

[14] 章文波,刘宝元.基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J].水土保持学报,2003,17(2):89-92.

[15] 柯克比.土壤侵蚀[M].北京:水利电力出版社,1987.

(上接第 227 页)

[12] 袁道先,薛禹群,傅家谟,等.防止我国西南岩溶地区地下河变成"下水道"的对策和建议[R].北京:中国科学院院士建议,2007:1-16.

[13] Ayres R U. Commentary on the utility of the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 2000, 3(3):347-349.

[14] 于冰,徐琳瑜.城市水生态系统可持续发展评价:以大连市为例[J].资源科学,2014,36(12):2578-2583.

[15] Tang Zhong, Xiang Hao. Analysis of major driving forces of ecological footprint based on the STIRPAT model and RR method: A case of Sichuan Province, Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2011,8(4):611-618.

[16] 燕华,郭运功,林逢春.基于 STIRPAT 模型分析 CO_2 控制下上海城市发展模式[J].地理学报,2010,65(8):983-990.

[17] 杨万平,袁晓玲.环境库兹涅茨曲线假说在中国的经验研究[J].长江流域资源与环境,2009,18(8):704-710.

[18] 张哲,梁冯珍.基于弹性网回归的居民消费价格指数分析[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2013,29(5):592-597.

[19] De Mol C, De Vito E, Rosasco L. Elastic-net regularization in learning theory[J]. Journal of Complexity, 2009,25(2):201-230.

[20] Zou H, Hastie T. Zou H, Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2005, 67(2):301-320.

[21] 贾俊松.河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策[J].生态学报,2011,31(8):2188-2195.

[22] 肖思思,黄贤金,吴春笃.江苏省生态足迹时间维度变化及其驱动因素分析:基于 PLS 方法对 STIRPAT 模型的修正[J].地理与地理信息科学,2012,28(3):76-82.