

基于样带的陕西省水土流失规律研究

周晓晴, 马芊红, 张科利

(北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 陕西省是我国水土流失最严重的地区之一, 利用第一次全国水利普查水土保持调查专项数据, 抽取横向7条、纵向2条典型样带, 共314个调查单元, 对比分析了陕西省坡度、坡长、土地利用类型对土壤侵蚀影响的区域差异。结果表明: (1) 横向样带自北向南坡度均值先减小后增大, 黄土高原地区坡度 $<20^\circ$ 和 $>30^\circ$ 的地块土壤侵蚀模数高于其他地区; 整体来看, 陕西省土壤侵蚀的临界坡度在 $15^\circ\sim 30^\circ$; (2) 随坡长的增加, 土壤侵蚀模数整体呈波动增长, $10\sim 20\text{ m}$ 和 $>30\text{ m}$ 坡长范围内, 黄土高原地区土壤侵蚀最为严重; (3) 耕地、园地土壤侵蚀模数高于林地、草地, 耕地与园地土壤侵蚀模数自北向南呈增—减—增的变化特征; (4) 区域对比来看, 自北向南土壤侵蚀模数先减小后增大, 侵蚀强度从大到小依次为黄土高原区、秦巴山地区、关中平原区; 纵向样带土壤侵蚀模数均在 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 左右。研究结果为认识陕西省土壤侵蚀因子区域差异, 明确水土流失空间分异规律, 因地制宜地制定水土保持规划提供了重要依据。

关键词: 水土流失; 坡度; 坡长; 土地利用; 样带; 陕西省

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0047-07

Study on the Characteristics of Soil and Water Loss in Shaanxi Province Based on Transects

ZHOU Xiaoqing, MA Qianhong, ZHANG Keli

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Shaanxi Province is one of the most serious soil erosion regions in China. According to the special investigation of soil and water conservation of the First National Water Census, we selected nine typical transects (seven transverse transects and two longitudinal transects) which contained 314 survey units and calculated soil erosion moduli using CSLE for each block in Shaanxi Province. Based on the data, the regional effects of slope gradient, slope length and land utilization types on soil erosion were compared and analyzed. The results showed that: (1) slope gradients of transverse transects decreased from the Loess Plateau to the Guanzhong Plain, and increased from the Guanzhong Plain to the Qinbashan mountainous region; the soil erosion moduli of blocks with a slope gradient $>20^\circ$ or $<30^\circ$ on the Loess Plateau were greater than other regions; on the whole, the critical slope gradient for soil erosion in Shaanxi Province was between $15^\circ\sim 30^\circ$; (2) soil erosion moduli increased in fluctuation with the increase of slope length; compared with other regions, soil erosion on the Loess Plateau was more serious in the slopes with length range of $10\sim 20\text{ m}$ and $>30\text{ m}$; (3) soil erosion moduli of farmland and orchard were higher than those of woodland and grassland, the soil erosion moduli of farmland and orchard increased at the beginning, then decreased, and increased again later with transects change from north to south; (4) comparing the regional differences, from north to south, the soil erosion moduli of transverse transects decreased firstly and then increased. Soil erosion of the Loess Plateau region was the most serious, followed by Qinbashan mountainous region, and soil erosion of Guanzhong Plain was slight. The soil erosion moduli of longitudinal transects were about $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$. This study has great significance in recognizing regional differences of soil erosion factors, defining the spatial variation laws of soil and water loss, and developing soil and water conservation planning according to local conditions in Shaanxi Province.

收稿日期: 2017-07-07

修回日期: 2017-09-05

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045); 国家重点研发计划项目“近年来国家重大生态工程关键技术评估”(2016YFC0503704)

第一作者: 周晓晴(1992—), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤资源利用与保护。E-mail: xzhou@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张科利(1962—), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

Keywords: soil and water loss; slope gradient; slope length; land utilization type; transect; Shaanxi Province

土壤侵蚀是人类面临的限制全球经济社会可持续发展的严峻环境问题,严重的土壤侵蚀会破坏土地生产力,降低生物多样性,威胁区域生态环境安全,加剧山区贫困^[1]。受自然因素和人为因素共同作用,陕西省水土流失极其严重,其土壤侵蚀面积和侵蚀强度均高于全国大部分省份^[2]。第二次全国遥感调查资料显示,陕西省水土流失面积超过全省土地总面积的 60%,且仍有扩大趋势,全省 70% 的人口和 80% 的耕地正遭受水土流失危害^[3]。陕西省强烈的水土流失是黄河和长江河道泥沙的重要来源,另外水土流失问题不仅是制约陕西省建设成为西部强省的瓶颈,同时也是我国西部大开发战略中亟待解决的问题之一^[3]。

地处陕西省北部的黄土高原生态环境脆弱,土壤侵蚀非常强烈,因而成为我国乃至世界土壤侵蚀研究的重点区域^[4-5]。目前陕西全省尺度的土壤侵蚀综合研究相对较少,刘康等^[6]利用 GIS 空间叠加技术分析了陕西省水土流失的潜在敏感性和现实敏感性,其中微度到中度敏感性分布面积较大,而改变土地利用方式、破坏植被等人类活动增大了高度现实敏感性区域的面积;李雄飞^[7]利用陕西省 62 个水文站河流泥沙观测资料,推求流域土壤侵蚀模数,结果表明,陕西省土壤侵蚀空间分异特征明显,陕北地区土壤侵蚀十分剧烈,关中和陕南地区侵蚀强度较弱;程琳等^[8]通过遥感技术、调查统计、前期积累资料得到陕西省土壤侵蚀各因子值,利用中国土壤流失方程(CSLE)估算土壤侵蚀模数,并结合 GIS 技术分析土壤侵蚀空间特征,表明陕西省土壤侵蚀整体上呈北高南低的变化趋势。然而,陕西省水土流失规律的已有研究对水土流失影响因子空间分布规律的对比分析尚有不足且均未采用水土流失实地调查资料,而基于地块的野外资料在反映区域水土流失中最直接、最准确、最有效。本研究以第一次水利普查中水土保持专项调查数据为依据,在陕西省抽取 9 条典型样带(横向 7 条、纵向 2 条),系统分析地形因子和土地利用类型对土壤侵蚀影响的区域差异,探究水力侵蚀空间分异特征,从而为明确陕西省水土流失综合特征,制定合理的水土保持规划提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省地处我国中部腹地($31^{\circ}42'—39^{\circ}35'N$, $105^{\circ}29'—111^{\circ}15'E$),南北长达 880 km,东西相距 160~490 km,面积约 20.56 万 km^2 。陕西省北部和南部

分别为黄土高原和秦巴山地,地势较高,中部为地势低平的关中平原。受地形与季风影响,陕西省降水时空分异明显,陕北、关中、陕南 3 区年均降雨量分别为 279, 563, 840 mm,自北向南分属中温带半干旱区、暖温带半湿润区和亚热带湿润区^[9],植被类型依次为温带草原、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林。陕西省开发历史悠久,土地利用类型以农地、林地、草地为主,退耕还林还草工程使陕北地区林草面积增大,关中平原适宜耕作,陕南地区林地居多^[10]。复杂的自然地理条件以及对水土资源的无序利用,使陕西省水土流失面积大、侵蚀强度高、危害严重且难以治理,严重制约着该区生态环境建设与经济社会可持续发展。根据自然环境与水土流失特征的区域差异,本文选取 2 条纵向样带,7 条横向样带,陕北、关中、陕南各 3 条、1 条、3 条(图 1,表 1)。

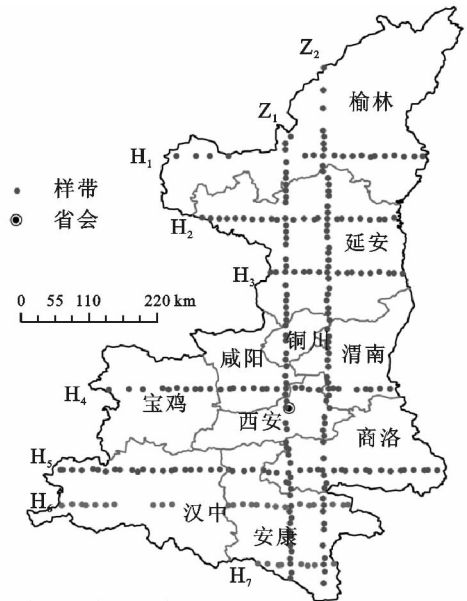


图 1 调查样带分布

1.2 数据来源

本研究在陕西省选取的 9 条样带共包含 314 个调查单元,1 812 个地块,基于 2010—2012 年开展的水土保持专项调查数据,采用 CSLE 计算调查区域土壤侵蚀模数^[11]。首先将全国划分为 4 级网格,按照 4% 的抽样密度,将控制区(5 km×5 km)中心 1 km^2 的基本抽样单元(平原区)或与中心网格相连面积为 0.2~3.0 km^2 的小流域(山地丘陵区)作为实际野外调查单元,土壤侵蚀微弱地区,可降低抽样密度。调查土地利用类型时,先制作野外调查底图和调查表,然后实地到野外调查单元勾绘调查图,填写水蚀野外调查表,依据野外调查单元土地利用现状分类中的二级分类划分土地利用类型。野外调查时,将土地利用

类型、水土保持措施和盖度(郁闭度)均相同的连续区域划为同一地块,记录地块基本属性信息,回到室内清绘调查成果草图,根据植被盖度、土地利用、水土保持措施等信息,分别计算水土保持措施因子 B, E, T 。根据各县 1981—2010 年 30 a 逐日降雨资料,计算降雨侵蚀力 R ;以中国土壤发生分类中的土属信息为依

据,确定土壤可蚀性 K ;利用调查区地形信息提取并计算坡度因子 S 和坡长因子 L ^[12]。坡度坡长因子计算基于 1 : 10 000 地形图插值生成的 DEM,坡度为采用 D8 算法计算所得最大坡降方向的坡度值,坡长用累积径流算法获取。将各土壤侵蚀因子连乘,即得到各地块和调查单元的多年平均土壤水蚀模数^[11]。

表 1 调查样带基本信息统计

样带	经/纬度范围	单元数/个	地块数/个	面积/km ²	所经地区
H ₁	37.55°—37.65°N	18	125	9.60	子洲、绥德、吴堡、定边、横山
H ₂	36.70°—36.80°N	24	210	13.45	吴旗、延川、安塞、延安等
H ₃	36.00°—36.10°N	17	56	12.25	洛川、宜川、富县
H ₄	34.50°—34.55°N	31	368	26.84	临潼、宝鸡、岐山、渭南、华阴等
H ₅	33.40°—33.50°N	47	103	42.55	城固、丹凤、佛坪、镇安等
H ₆	32.95°—33.00°N	26	179	19.41	宁强、城固、石泉、汉阴、安康等
H ₇	32.17°—32.22°N	10	22	12.03	平利、岚皋、镇坪、紫阳
Z ₁	108.90°—109.00°E	73	348	59.52	靖边、安塞、铜川、咸阳、长安等
Z ₂	109.40°—109.50°E	68	401	48.35	榆林、子洲、安塞、洛川、渭南等

1.3 数据处理

调查单元和地块基本信息的存储与整理以及各因子值、土壤侵蚀模数的计算在 Excel 2010 中完成。在 SPSS 18.0 中对数据进行描述性统计分析,得出各指标平均值、最大值、最小值、标准差等并计算变异系数,对各样带侵蚀模数与坡度及坡长的关系进行相关分析,对不同坡度、坡长、土地利用类型、横向样带上的侵蚀模数均值进行方差分析等。在 ArcMap 10.2 和 Origin 8.5 中绘制调查样带分布图、土壤侵蚀模数随坡度坡长变化图、不同土地利用类型土壤侵蚀模数区域差异图等。

2 结果与分析

2.1 坡度与土壤侵蚀

将各样带所有地块坡度平均值作为该样带坡度

均值,统计特征表明(表 2),横向样带坡度均值自北向南呈先减小后增大的变化趋势;位于陕南秦巴山区的 H₆ 坡度均值最大,高达 48.04°;地处关中平原的 H₄ 坡度均值最小,仅为 4.03°,其中低于 10°的地块面积占该样带总面积的 76.22%;纵向样带对比来看,Z₂(东侧)坡度均值略高于 Z₁(西侧)。陕南秦巴山区坡度变异系数最小,坡度分布集中,其次是陕北黄土高原地区,关中平原为地堑式构造平原,台塬面向河谷平原呈阶梯状倾斜,个别地块坡度远高于均值,提高了该地坡度的变异性。横向样带大部分呈负偏态分布,说明坡度大于均值的地块较多,关中平原样带 H₄ 则为正偏态分布,表明大部分地块坡度低于均值 4.03°。H₄ 的峰度系数远高于其他样带,坡度分布曲线呈尖峰状。

表 2 各样带不同坡度下侵蚀模数均值对比 t/(km² · a)

样带	0°~5°	5°~10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	25°~30°	30°~35°	>35°
H ₁	23.23	97.52	1425.83	2514.59	2615.97	2488.76	5257.93	2672.68
H ₂	38.00	1992.03	1544.67	2786.96	2537.58	2321.44	1177.98	1130.53
H ₃	787.91	946.46	3597.11	4164.95	2430.30	842.96	323.34	—
横向 H ₄	44.81	513.12	499.12	1496.28	807.55	1688.31	652.28	1070.33
H ₅	—	71.08	44.61	564.43	790.24	259.58	405.88	563.63
H ₆	—	17.40	236.61	887.95	867.41	1520.41	1100.82	712.18
H ₇	—	—	—	2174.43	7961.81	5149.83	1933.60	305.19
纵向 Z ₁	84.08	871.52	997.67	737.69	1965.13	2744.88	1487.27	388.37
Z ₂	199.70	941.25	1696.67	2465.32	1441.66	1622.11	949.63	982.27

坡度通过影响土壤质地、累积入渗量、坡面径流水深及流速、坡面流切应力等因素决定土壤侵蚀的强弱,制约土地利用方向及水土保持措施布设。除 H₄ 和 H₅ 外,其余样带内地块土壤侵蚀模数先随坡度增大而增大,而后随坡度增大后减小,这与众多研究认

为土壤侵蚀存在临界坡度的观点一致^[13]。可能受主要侵蚀方式影响,不同样带达到最大土壤侵蚀模数的坡度范围有所不同^[13],H₄,H₅ 和 Z₂ 在坡度 15°~20°内土壤侵蚀模数最大,H₁,H₇ 土壤侵蚀模数在 20°~25°达到最大值,H₆ 与 Z₁ 则在 25°~30°范围内土壤

侵蚀模数最大。 H_4 土壤侵蚀模数随坡度增加整体上呈波动增加趋势,该样带土壤侵蚀模数与坡度呈极显著正相关关系($p<0.01$),相关系数为 0.59,高于其他样带;坡度小于 30° 时, H_5 土壤侵蚀模数随坡度增大先增后减,在 $20^\circ\sim25^\circ$ 范围内侵蚀模数达最大值,坡度大于 30° 后,土壤侵蚀模数有所增大。整体而言,陕西省土壤侵蚀模数随坡度增加呈先增加后减小的变化特征,在 $15^\circ\sim30^\circ$ 土壤侵蚀模数最大(图 2),表明陕西省土壤侵蚀的临界坡度在此范围之内。

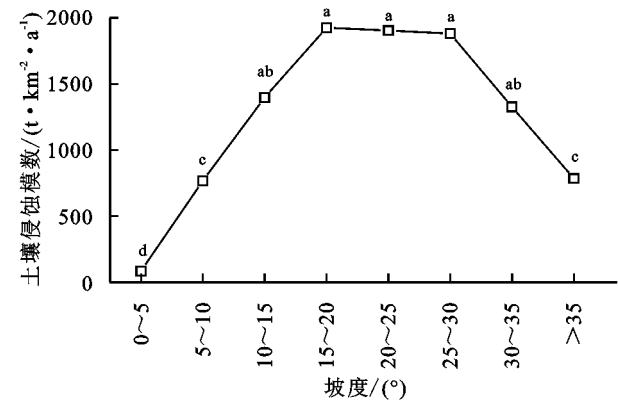


图 2 土壤侵蚀模数随坡度变化特征

从空间分布特征来看,各坡度范围内横向样带土壤侵蚀模数均在黄土高原或秦巴山区南段最高,在关中平原或秦巴山区北段最小。自北向南 $0^\circ\sim10^\circ$ 坡度范围内土壤侵蚀模数先增后减,在 H_2 或 H_3 处达最大值; $10^\circ\sim20^\circ$ 坡度范围内土壤侵蚀模数呈增—减—增的变化趋势, H_3 处达最大值, H_5 处达最小值; $20^\circ\sim35^\circ$ 坡度范围内整体上土壤侵蚀模数呈先减小后增加的变化特征; $>35^\circ$ 后,土壤侵蚀模数总体上由北向南递减。

东西对比来看, $0^\circ\sim20^\circ$ 和 $>35^\circ$ 坡度范围内,东侧样带 Z_2 土壤侵蚀模数大于西侧 Z_1 ; $20^\circ\sim35^\circ$ 范围内, Z_1 土壤侵蚀模数大于 Z_2 。根据容许土壤流失量和水力侵蚀强度分级^[14]可知,黄土高原地区坡度 $>10^\circ$ 的地块基本上均存在轻度或中度侵蚀,其中样带 H_1 在 $30^\circ\sim35^\circ$ 为强烈侵蚀,坡度 $<20^\circ$ 和 $>30^\circ$ 时,土壤侵蚀模数均在黄土高原地区达到最大值,充分表明黄土高原地区是我国乃至世界土壤侵蚀极严重的地区之一。关中平原是陕西省的农业基地、经济中心,样带 H_4 在地势起伏地区仍存在轻度侵蚀,需加以关注。陕南地区 H_7 样带山体陡峭,在 $20^\circ\sim30^\circ$ 侵蚀强烈,高于其他样带,这与当地人人为破坏植被,陡坡开荒有关。

2.2 坡长与土壤侵蚀

坡长是影响坡面径流与侵蚀产沙过程的重要地形因子之一,USLE 中规定坡长为地表径流源点到达有沉积出现的地方或明显渠道的水平距离^[15]。将各样带所有地块坡长平均值作为该样带坡长均值,统计特征表明(表 3),关中平原地区样带 H_4 坡长均值最小,为 18.08 m;陕北黄土高原和陕南秦巴山地的坡长均值相近,约为 30 m;东西两条样带坡长均值相似,约 28 m。可能是由于人类活动对地表特征的改变较大,关中平原地区坡长变异系数高于黄土高原地区和秦巴山地区。与坡度相比,坡长的变异系数较小,说明陕西省坡长对区域特征、土地利用方式等因素的变化不如坡度敏感;另外坡长与土壤侵蚀模数的相关系数略小于坡度,表明坡长因子对土壤侵蚀模数的影响程度低于坡度。

表 3 各样带不同坡长下侵蚀模数均值对比 t/(km²·a)

样带		0~10 m	10~20 m	20~30 m	30~40 m	40~50 m	>50 m
横向	H ₁	40.69	1071.42	2051.68	3373.91	5289.62	—
	H ₂	211.61	945.59	2242.51	1965.65	2492.64	6025.43
	H ₃	—	3053.38	3041.63	692.16	4305.86	—
	H ₄	12.55	32.94	347.27	607.95	231.57	543.76
	H ₅	—	51.94	729.38	204.51	828.45	301.67
	H ₆	139.72	514.73	835.22	1070.78	1269.41	2126.57
	H ₇	3330.59	—	5127.11	1736.98	—	—
纵向	Z ₁	21.36	197.22	848.49	1266.89	2209.32	1219.15
	Z ₂	152.37	860.86	1304.34	1164.90	1556.53	1147.82

坡面径流水动力条件、降雨侵蚀力等因素随坡长的变化影响土壤侵蚀过程和强度^[15]。各样带土壤侵蚀模数随坡长的变化规律不尽相同, H_1 , H_2 , H_6 土壤侵蚀模数整体上随坡长增大而增大; H_3 土壤侵蚀模数随坡长增加先增加后减小; H_4 和 H_5 样带土壤侵蚀模数随坡长呈波动增长,均属微度侵蚀。纵向两条样带,坡长 <50 m 时,土壤侵蚀模数与坡长呈正相

关,坡长 >50 m 后,土壤侵蚀模数反而有所降低,主要是由于随坡长增加,水体能量多用于搬运坡上侵蚀泥沙,因而侵蚀有所减弱^[15]。相关研究表明坡长对土壤侵蚀强度的影响存在 3 种方式,分别为增长型(土壤侵蚀强度随坡长增加而增大)、增减型(土壤侵蚀强度随坡长增大先增强后减弱)、波动型(坡长增加过程中,土壤侵蚀强度出现两次增加、两次减小),增

长型关系常用于坡面土壤侵蚀模型中^[15]。方差分析表明,各坡长范围内土壤侵蚀模数存在显著差异($p<0.01$),40~50 m 坡长范围内土壤侵蚀模数最高。总体来看,本研究中坡长与土壤侵蚀模数的关系可归为波动型(图 3),0~30 m 和 40~50 m 土壤侵蚀模数随坡长增加,30~40 m 和 >50 m 土壤侵蚀模数略有下降,在该坡长范围内土壤侵蚀模数降低的原因仍需进一步探究。

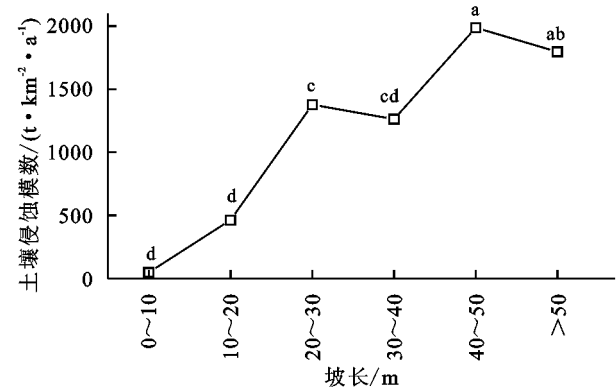


图 3 土壤侵蚀模数随坡长变化特征

各坡长范围段内的土壤侵蚀模数在区域间变化趋势明显,基本上均在黄土高原地区或秦巴山地区达到最大值,而在关中盆地达最小值。黄土高原地区坡长超过 10 m 后,土壤侵蚀强度在轻度到强烈间变化,且坡长 10~20 m、>30 m 后土壤侵蚀模数为所有样带中的最大值,再次表明黄土高原土壤侵蚀问题

极其严重。秦巴山地区 H₆ 坡长超过 30 m 后,土壤侵蚀模数高于允许土壤流失量;秦巴山地南部的 H₇ 样带所在地区多中深度切割且具岩溶地貌特征的中低山,山高谷深,地势起伏大,基岩疏松破碎,侵蚀较强烈^[16],0~10 m 和 20~30 m 坡长范围内土壤侵蚀模数均高于其他样带。

2.3 土地利用与土壤侵蚀

土地利用方式是人类影响土壤侵蚀的最直接的途径,不合理的人类活动会破坏植被,恶化土壤结构,增加地表径流,从而加剧土壤侵蚀的发生和发展^[17]。统计分析调查单元各土地利用类型地块可知(表 4),样带共包括地块 1 711 个,总面积为 23 290 hm²,其中林地面积占比最大,为 65.80%,其次为耕地,所占比例为 17.34%,草地面积也较大,占调查总面积的 9.15%。各土地利用类型侵蚀模数均值从大到小依次为其他土地>耕地>园地>草地>居民点及工矿用地>林地>交通运输用地>水域及水利设施用地。耕地土壤侵蚀模数整体较大,为 2 168.88 t/(km²·a),分别为林地和草地侵蚀模数均值的 4.18 倍和 3.10 倍,这主要是由于与林草地相比,耕地受枯落物、地表结皮、根系的保护作用较小,同时人类耕作活动对耕地土壤扰动强烈,土壤结构松散,易被侵蚀。园地中果树冠层在一定程度上削弱了降雨动能,因而侵蚀强度低于耕地;但园地地表常处于裸露状态,缺少植被保护,故土壤侵蚀模数高于林地和草地。

表 4 不同土地利用类型土壤侵蚀强度面积占比 %

侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀强度 分级	土地利用类型							
		耕地	园地	林地	草地	居民点及 工矿用地	交通运输 用地	水域及水 利设施用地	其他 土地
<1000	微度	77.20	82.59	93.16	72.11	98.06	100	100	86.83
1000~2500	轻度	7.20	5.36	6.33	27.89	1.20	0	0	0.60
2500~5000	中度	10.05	7.55	0.51	0	0.18	0	0	0
5000~8000	强烈	3.80	4.03	0	0	0.23	0	0	0
8000~15000	极强烈	1.64	0.47	0	0	0.28	0	0	0
>15000	剧烈	0.12	0	0	0	0.05	0	0	12.57

土地利用类型侵蚀强度分级对比结果表明(表 4),林地和草地几乎全部地区土壤侵蚀强度属轻度侵蚀以下,由此可见,退耕还林还草是保护水土资源,抑制土壤侵蚀,改善区域生态环境的有效生物措施;15.61%的耕地和 12.05%的园地受到中度以上土壤侵蚀,5.56%的耕地和 4.50%的园地土壤侵蚀强度达强烈以上,加之耕地和园地面积较大,因此耕地、园地两类土地利用类型对陕西省土壤侵蚀的贡献最大。超过 98%的居民点及工矿用地和全部的交通运输用地、水域及水利设施用地属微度侵蚀。其他土地利用类型地块偏少,面积较小,土壤侵蚀模数存在较大变

异性和不确定性。

耕地、园地、林地、草地 4 种土地利用类型占地面积最大,且与粮食安全,区域生态环境关系密切。对比区域间土壤侵蚀程度可知(图 4),该 4 类土地利用方式的土壤侵蚀模数在样带间均存在显著差异($p<0.01$)。自北向南耕地土壤侵蚀模数呈增—减—增的变化特征,在 H₃ 处达到最大值[8 493.58 t/(km²·a)],属极强烈侵蚀,其次为秦巴山地区的 H₇,关中平原 H₄ 处达到最小值[356.82 t/(km²·a)]。由北向南园地土壤侵蚀模数也呈增—减—增变化,H₂ 处园地侵蚀模数最大,关中平原地区最低,黄土高原地区高

于秦巴山地区;为了便于管理,园地的梯田化率高于耕地,因而整体土壤侵蚀程度低于耕地。林地和草地整体侵蚀程度较低,林草地土壤侵蚀模数均在黄土高原地区的 H_1 处达到最大值,其次为 H_2 ,两者对比来看, H_1, H_2, H_6 处林地土壤侵蚀模数高于草地,而 H_4 处草地侵蚀模数高于林地,表明黄土高原区与秦巴山地区草地抑制土壤侵蚀的作用更大,关中平原区林地水土保持效益更佳。纵向两条样带对比来看,西侧 Z_1 耕地侵蚀模数大于东侧 Z_2 ,园地、林地、草地侵蚀模数则是 Z_2 大于 Z_1 。

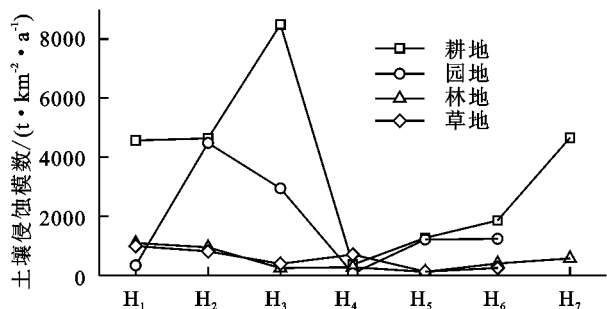


图4 4种典型土地利用类型侵蚀模数区域差异

2.4 土壤侵蚀区域差异

陕西省黄土高原区、关中平原和秦巴山地区三大自然地理单元的自然环境、人类活动及水土流失特征均存在巨大差异,认识水土流失区域差异可以为因地制宜地布设水土保持措施提供重要依据。整体来看,纵向样带土壤侵蚀模数均值无显著差异,均在 $1\ 000\ t/(km^2 \cdot a)$ 左右,这主要是由于两条样带距离较近,自然环境特征、人类活动相似; Z_2 略高于 Z_1 ,主要是由于 Z_2 平均坡度略大于 Z_1 。方差分析结果表明,各样带土壤侵蚀均值存在显著差异($p < 0.05$) (图5),随调查样带自北向南变化,土壤侵蚀模数先减小后增加,侵蚀强度从大到小依次为陕北黄土高原区、陕南秦巴山地区、关中平原区。本研究所得土壤侵蚀空间分异特征与李雄飞^[7]、程琳等^[8]的研究结果一致。

陕北黄土高原土壤侵蚀模数高于其他地区,三条样带侵蚀模数均在 $2\ 000\ t/(km^2 \cdot a)$ 左右,接近中度侵蚀。 H_1 到 H_3 土壤侵蚀模数有所降低,这主要是由于样带 H_1, H_2 所经地区梁峁起伏,地面支离破碎, H_3 样带塬面相对平坦^[16],另外由 H_1 到 H_3 植被覆盖度逐渐提高,从而在一定程度上抑制了土壤侵蚀。退耕还林还草工程的实施使黄土高原区土壤侵蚀问题得到有效改善,侵蚀强度有所下降,但土壤侵蚀面积仍占区域面积的60%以上,仍是我国治理水土流失的重中之重^[5]。该地应进一步研究退耕后近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响,从而为退耕还林还草工程的可持续发展和区域水土保持规划提供依据。

关中平原地区主要由黄土台塬和河谷平原组成,地形较平缓,适宜农耕, H_4 是横向样带中侵蚀模数最低的,为 $187.37\ t/(km^2 \cdot a)$ 。作为陕西省经济、政治、文化中心所在地,关中平原应合理规划利用土地资源,注重防治潜在水土流失。秦巴山地区是陕西省降水量最多的地区,年降雨量达 $1\ 000\ mm$ 左右,且降雨集中于夏秋两季;另外该地区地势起伏大,山谷相间分布,土层浅薄,多陡坡开荒,人为毁坏植被情况较为严重,因而该区土壤侵蚀强度仅略低于黄土高原地区。该地三条样带侵蚀模数由北向南逐渐增大,样带 H_7 侵蚀模数为横向样带中的最大值。秦巴山地区迫切需要加强坡地治理,对于 25° 以上的陡坡耕地坚决退耕,将小流域治理与开发承包到户,工矿交通建设中注重保护环境,结合多种途径促进山区农民脱贫致富。

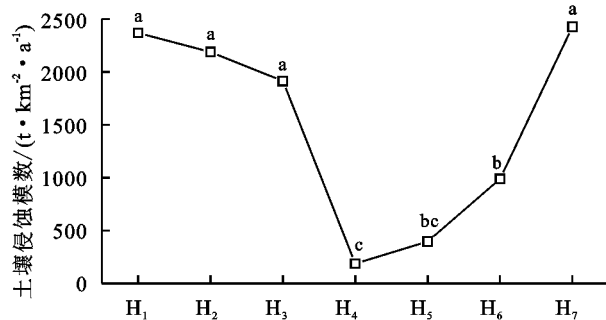


图5 横向样带侵蚀模数均值对比

3 结论

(1) 横向样带坡度均值自北向南呈先减小后增大,在黄土高原地区地块坡度 $< 20^\circ$ 和 $> 30^\circ$ 的土壤侵蚀模数最大,陕南地区 H_7 在坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$ 侵蚀高于其他样带。整体来看,陕西省土壤侵蚀模数随着坡度增大呈先增后减的趋势,土壤侵蚀的临界坡度为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。

(2) 各样带土壤侵蚀模数随坡长的变化特征复杂,综合来看,土壤侵蚀模数随着坡长的增加呈波动增长趋势。 $10 \sim 20\ m$ 和 $> 30\ m$ 坡长范围内,黄土高原土壤侵蚀模数最大; $< 10\ m$ 和 $20 \sim 30\ m$ 坡长范围内秦巴山地区土壤侵蚀模数最大。

(3) 耕地、园地两种地类对陕西省土壤侵蚀的贡献相对较大,林地和草地整体侵蚀程度较低。耕地与园地土壤侵蚀模数自北向南呈增—减—增变化,最大值分别位于样带 H_2 和 H_3 处。

(4) 纵向样带土壤侵蚀模数均在 $1\ 000\ t/(km^2 \cdot a)$ 左右,自北向南横向样带土壤侵蚀模数先减小后增大,侵蚀强度从大到小依次为陕北黄土高原区、陕南秦巴山地区、关中平原区,各地应因地制宜布设水土保持措施,防治水土流失。

参考文献:

- [1] 齐清,王天明,寇晓军,等. 基于 GIS 的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 1-5.
- [2] 李智广,曹伟,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.
- [3] 张勇. 陕西省水土流失现状、存在问题与防治对策[J]. 水利发展研究, 2004, 4(11): 47-49.
- [4] Li P, Mu X, Holden J, et al. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 170: 17-30.
- [5] 孟庆香,刘国彬,杨勤科,等. 黄土高原土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 20-22.
- [6] 刘康,康艳,曹明明,等. 基于 GIS 的陕西省水土流失敏感性评价[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 168-170.
- [7] 李雄飞. 陕西省土壤侵蚀模数计算与空间分布特征[J]. 陕西水利, 2014(4): 122-123.
- [8] 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61-66.
- [9] 刘闻,曹明明,宋进喜,等. 陕西年降水量变化特征及周期分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 865-874.
- [10] 李团胜. 陕西省土地利用动态变化分析[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 157-164.
- [11] Liu B, Zhang K, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[C]// Yuren J. Proceedings of the 12 th international soil conservation organization conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [12] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [13] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 415-421.
- [14] 陈学兄. 基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [15] 孔亚平,张科利,曹龙熹. 土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 43-47.
- [16] 聂树人. 陕西自然地理[M]. 西安:陕西人民出版社, 1981.
- [17] 赵文武,傅伯杰,吕一河,等. 多尺度土地利用与土壤侵蚀[J]. 地理科学进展, 2006, 25(1): 24-33.

~~~~~

(上接第 46 页)

- [12] 冯浩,吴普特,黄占斌. 聚丙烯酰胺(PAM)对黄土地坡降雨产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 48-51.
- [14] 夏海江,杜尧东,孟维忠. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2000, 4(3): 14-17.
- [15] 韩昌福,李大平,王晓梅. 聚丙烯酰胺生物降解研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(5): 648-650.
- [16] 张学佳,纪巍,康志军,等. 聚丙烯酰胺降解的研究进展[J]. 油气田环境保护, 2008, 18(2): 41-45.
- [17] 魏霞,李勋贵, Huang Chihua. 玉米茎秆汁液防治坡面土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 173-178.
- [18] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 39-44.
- [19] 毛艳玲,杨玉盛,崔纪超. 土壤团聚体颗粒有机碳对土地利用变化的响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 188-191.
- [20] Arvidsson J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments[J]. *Soil & Tillage Research*, 1998, 49(1/2): 159-170.
- [21] Abu Hamdeh N H, Abo Qudais S A, Othman A M. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(6): 609-616.
- [22] Alvarez R, Steinbach H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 1-15.
- [23] Milne R M, Haynes R J. Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(3): 172-178.
- [24] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101(1): 57-61.