

北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异

冉涛¹, 邓伟^{1,2}

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 榆林是我国北方农牧交错带典型的生态脆弱区, 土壤侵蚀严重制约着榆林地区人类生存和社会经济的可持续发展。以通用土壤流失方程为理论基础, 选取自然因素(包括降雨、地形和土壤因子)和人为参数(包括生物措施、农业措施和社会经济措施因子)构建评估指标体系。在完成单因子敏感性评价的基础上, 利用GIS空间叠加分析功能, 对榆林市土壤侵蚀敏感性空间分异特征进行了综合研究。结果表明: 研究区土壤侵蚀敏感性以中敏感为主, 低敏感和高敏感次之, 不敏感仅有零星分布。空间上土壤侵蚀敏感性程度呈南部黄土沟壑区向北部风沙草滩区递减趋势, 高敏感区主要集中在靖边、定边两县南端, 东部黄河沿岸以及南六县的部分地区。修正后的土壤侵蚀敏感性评价结果与前人研究的土壤侵蚀分布规律趋于一致, 充分说明人类活动对土壤侵蚀也产生了极大影响。因此, 急需转变不合理的土地利用方式, 加强水土流失治理和植被恢复, 针对不同敏感区实施分区管理, 有效控制研究区能源开发建设对土壤侵蚀潜在发生的影响程度。

关键词: GIS; 土壤侵蚀敏感性; 空间分异特征; 榆林市

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0182-05

Spatial Differentiation of Soil Erosion Sensitivity in Ecologically Vulnerable Areas

RAN Tao¹, DENG Wei^{1,2}

(1. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 401147, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China)

Abstract: Yulin City, which is located in the transition zone sandwiched between Mu Us Desert and Plateau hilly-gully region, is not only a typical ecologically vulnerable area in agro-pastoral transitional zone of North China, but also a key ecological function protection area with soil conservation and sand fixation in China. Affected by aeolian landform, arid climate, sparse vegetation and high-strength land use during recent years, soil erosion has become the main ecological disaster in Yulin. Soil erosion seriously restricts human survival and socio-economy sustainable development of the region. So many scholars have paid much attention to the soil erosion problems in the study area. Based on the Universal Soil Loss Equation theory and GIS spatial analysis function, three natural factors (precipitation, terrain and soil factors) affecting soil erosion, and other three artificial parameters (biological measures, agricultural measures and socio-economic measures factors) were collected as the evaluation indexes to make the assessment equations. Then assessment of each factor was produced and an integrated soil erosion sensitivity evaluation was examined by using GIS. Furthermore, distribution characteristics and spatial difference of sensitivity of soil erosion in the study area were also analyzed. The sensitivity of the influences was classified into four degrees. The result demonstrates that moderate sensitive is the main type of soil sensitivities in the Yulin, followed by slight sensitive and strong sensitive distribute, and the area proportion with non-sensitivity is very small. Based on the overall distribution patterns, the general trend of soil erosion sensitivity descends from the southern loess hilly-gully areas to the northern sandy marsh areas. The strong soil erosion sensitivities mainly distribute in the south of Jingbian and Dingbian Counties, the Yellow River coast area in the eastern and the part areas of six counties in the south. The evaluation results of improved soil erosion sensitivities equation were found to be consistent with the previous studies for Yulin. It fully illustrates that biological measures, agricultural

measures and socio-economic measures also have the great impacts on soil erosion and human activities are the inducement of soil erosion. Especially two indicators, population density and unit land area GDP introduce into assessment could reflect the impact on soil erosion by human activities more accuracy. Therefore, irrational land use should be changed, water and soil loss prevention should be strengthened and cured urgently, and partition management for different sensitive areas should be implemented so as to prevent soil erosion aggravation. Strong sensitivity area should be delimited as the priority area for soil erosion prevention and ecological restore. While moderate sensitivity is mainly located in the area of active social and economic activities, excessive and frequent human activities causing surface environmental damage to new disaster must be avoided. Light and non-sensitivity area mainly distribute in the northern sand mars areas with the flat terrain and the abundant irrigated agriculture. Therefore, prevention awareness should be strengthened and unreasonable construction causing soil erosion should be restricted. Because light and non-sensitivity just existe in the form of relativity, irrational human activities will bring a series of ecological problems.

Keywords: GIS; soil erosion sensitivity; spatial differentiation; Yulin City

榆林市位于毛乌素沙漠向黄土高原丘陵沟壑区的过渡地带,是我国北方农牧交错带上典型的生态脆弱区,也是我国土壤保持和防风固沙重要的生态功能保护区^[1],其生态质量的优劣直接关系到黄土高原地区和黄河流域的生态安全^[2]。受风沙地貌、干旱气候、复杂地形、稀疏植被和近年来大量开采资源的影响,土壤侵蚀已成为这一地区最为严重的生态环境问题^[3-4]。每年仅无定河输入黄河的泥沙就达 2.0 亿 t,被水土流失冲走的氮、磷、钾肥达 460 万 t,造成土壤养料和剖面被侵蚀殆尽,作物产量极低^[5]。大量学者对榆林市土壤侵蚀特点与分布规律进行了研究。郝慧梅^[6]等通过测算土壤水利侵蚀和生态系统土壤保持情况,分析了 1987—2002 年全市土壤保持效率的时空演变状况。李奎等^[7]对榆林市 2001 年、2010 年的土壤侵蚀状况及其空间分布特征进行了研究。李柏延等^[8]采用格网技术、空间插值、一元线性回归等技术,分析了榆林市 10 a 间土壤侵蚀动态变化,并对其未来演变情况进行了预测。这些研究成果,无疑提高了人们对榆林市土壤侵蚀问题的认识和理解。

土壤侵蚀敏感性是为了识别容易形成土壤侵蚀的区域,评价土壤侵蚀对人类活动的敏感程度^[9]。开展土壤侵蚀性综合分析,有利于精确划定土壤侵蚀敏感区域及其程度。基于此,本研究选取降雨侵蚀力、地形、土壤可蚀性 3 个自然因子和生物措施、农业措施和工程措施 3 个社会经济因建立土壤侵蚀敏感性评价方程,在 GIS 支持下对榆林市土壤侵蚀敏感性空间分异特征进行综合分析,旨在为榆林市划定重点水土保护区域、制定水土流失防治措施提供理论指导,同时为生态脆弱区生态环境改善和区域可持续发展提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况

榆林市位于陕西省最北部,地处毛乌素沙漠南缘,

黄河中游和黄土高原北麓,为北方典型的农牧交错区和生态脆弱区,也是黄土高原和内蒙古高原的过渡地带。全市辖 1 区 11 个县,总面积 43 578 km²,地理坐标位于北纬 36°57′—39°35′,东经 107°28′—111°15′。以古长城为界,以北是以风沙草滩区,地势较缓;以南是黄土丘陵沟壑区,地形起伏较大。区内地势由西部向东南倾斜,西南部平均海拔 1 600~1 800 m,其他各地平均海拔 800~1 200 m。气候上,属典型大陆性季风气候,具有低温、寒冷、降水稀少的气候特点,年平均降水量约 400 mm,多集中于 6—9 月份,年平均气温约 10℃。榆林市境内有 53 条河汇入黄河,其中八里河是陕西省最大的内陆河,红碱淖是区内最大的内陆湖泊,总面积 54 km²,总储水量 10 亿 m³。榆林市居于晋陕宁蒙能源矿产金三角中心腹地,是我国煤气油盐富集地区,近年来作为国家一个重要的能源与矿产基地,在全国能源工业发展和能源基地建设布局中具有特殊重要的战略地位。由于强烈的土地利用与干旱、风沙、严重的水土流失等脆弱生态环境并存,使得榆林生态环境更加多样、复杂和脆弱。

2 材料与方法

本研究选用目前广泛应用在水土流失预测和治理工作中的通用水土流失方程(USLE)^[10],该方程具有数据量更大、灵活性较高、实用性较强的特点^[11]。根据研究区特点和数据获取条件,选取降雨、地形、土壤、生物措施、农业措施和社会经济措施 6 个因子构建榆林市土壤侵蚀敏感性评价指标体系(表 1),建立评价方程(公式 1):

$$A=R \cdot K \cdot T \cdot B \cdot P \cdot E \quad (1)$$

式中:A 为土壤侵蚀量[t/(hm²·a)];R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·a)];K 为土壤可蚀性因子[(t·h/(MJ·mm)];T 为地形因子;B 生物措施因

子; P 为农业措施因子; E 为社会经济措施因子(其中 T, B, P, E 为无量纲因子)。

2.1 降雨侵蚀力 R 值

降雨是引起土壤侵蚀的直接动力因子,降雨量多少以及降雨形式直接影响土壤侵蚀程度的空间分布规律^[12]。降雨侵蚀力(R)是降水引起土壤侵蚀的潜在能力的主要动力^[13-14]。由于降雨特征和地理位置等因素不同,不同地区的 R 值最佳计算组合是有差异的^[15]。本文采用李静^[16]提出的适用于黄土高原地区 R 值的简易计算公式(2):

$$R = 0.0083x^2 + 1.0071x - 323.14 \quad (2)$$

式中: x 为研究区多年平均年降雨量。根据研究区及其周边省市 17 个气象站点 1955—2013 年日值连续观测降雨资料,统计各站点多年平均年降雨量。利用 ArcGIS 地统计学模块,经过数据分析,插值参数设定,插值结果交叉检验等处理,选取最优插值模型 *Ordinary Kriging* 内插法对 R 值进行空间化处理,得到降雨侵蚀力空间分布,并依据表 1 中的分级标准^[17]得到土壤侵蚀对降雨侵蚀力的敏感性分级图(附图 11)。

2.2 土壤可蚀性 K 值

土壤可蚀性表示土壤被侵蚀的难以程度,反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感性,是影响土壤流失量的内在因素。 K 值是由试验确定的定量数值,但在大区域范围内难以实现。

参考张科利、李月臣等人研究成果^[18-19],以研究区土壤类型图为基础,将榆林市主要地带性和非地带性 13 类土壤按照表 1 分级,并绘制土壤侵蚀对土壤可蚀性的敏感性分级图(附图 12)。

2.3 地形因子 T 值

地形是导致土壤侵蚀最直接的因素。宏观尺度上通常选用地形起伏度综合反映区域地形状况。地形起伏度是地面一定距离范围内最大的高程差,它反映了坡长、坡度等地形因子对土壤侵蚀的综合影响。以榆林市空间分辨率 30 m 的 Aster GDEM 影像为数据源,通过 ARCGIS 栅格邻域计算工具,取 7×7 窗口提取最大值与最小值计算地形起伏度,并按照表 1 分级标准绘制土壤侵蚀对地形因子的敏感性分级图(附图 13)。

2.4 生物措施因子 B 值

该因子由土地利用类型和植被覆盖构成。植被覆盖情况是影响土壤侵蚀最敏感的因素,NDVI 可以较好地表征地表植被覆盖状况。本文选取 2010 年 8 月 landsat7/TM 的近红外和红光波段计算获得研究区 NDVI 指数,空间分辨率为 30 m。结合榆林市 2010 年 1:10 万土地利用现状图,依据表 1 中的分级标准进行分类^[20],绘制土壤侵蚀对生物措施因子

的敏感性分级图(附图 14)。需要说明的是,建设用地虽然无植被覆盖,但一般不会产生土壤侵蚀,因此将其划入不敏感区。

2.5 农业措施因子 P 值

农业措施因子,即耕作方式对土壤侵蚀的影响。采用程琳等^[17]研究的陕西省不同坡度下的农业措施因子进行分级(表 1),并绘制土壤侵蚀对农业措施因子的敏感性分级图(附图 15)。

2.6 社会经济措施因子 E 值

采用人口密度和单位国土面积 GDP 两个指标来表征社会经济活动在土壤侵蚀敏感性变化中的影响程度。根据榆林市 2010 年社会经济数据,以各县为评价单元,按照表 1 进行分类评价,并绘制土壤侵蚀对社会经济措施因子的敏感性分级图(附图 16)。

2.7 土壤侵蚀敏感性综合评价

单因子的土壤侵蚀敏感性仅反映了某一因子对土壤侵蚀的作用程度或敏感性,由于不同影响因子对土壤侵蚀的作用不同,需要将土壤侵蚀敏感性的区域差异综合地反映出来。按照公式(3)计算土壤侵蚀敏感性指数:

$$SS_j = \sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 S_i \times W_i} \quad (3)$$

式中: SS_j 为 j 空间单元土壤侵蚀敏感性指数; S_i 为 i 因素敏感性等级值; W_i 为影响土壤侵蚀 i 因子的权重值。利用 ArcGIS 的空间叠加功能,采用自然分界法将 SS_j 分为四级。

由于自然和社会各因子对土壤侵蚀的作用不同,因此需要对各影响因子进行加权计算。参考前人研究成果^[4-7],结合专家打分, R, K, T, B, P 和 E 各因子的权重(W)分别赋予 0.25, 0.15, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1。

3 结果与分析

3.1 单因子敏感性评价

由表 2 可知,榆林市土壤侵蚀对降雨的敏感性以中敏感和高敏感为主,面积之和占比达 91.09%,空间分布与年降雨量趋于一致,敏感性由东南向西北方向逐级递减,高敏感性主要集中在南六县和西部靖边县南端。受长期自然演变和侵蚀,地带性自然土壤栗钙土和黑垆中的腐殖层已经消失,而黄绵土和风沙土保水能力低极易发生侵蚀,土壤可蚀性敏感性总体较高,高敏感性面积 32 956.54 km²,占幅员面积的 77.16%。地形因子对土壤侵蚀敏感性较明显,中敏感性和高敏感性面积之和比例达 65%,高敏感区主要集中在西部定边县和靖边县境内古长城以南地区;中敏感区主要集中在南部黄土沟壑区;古长城以北风沙草滩区地势相对平坦,对土壤侵蚀敏感性相对较低。榆林市地带性植被呈

荒漠、荒漠性草原向森林草原过渡特征, 主要以草地和耕地为主。受土地退化、城市化进程以及能源开发建设等影响, 榆林市总体植被覆盖情况不佳, 且空间分布差异明显, 生物措施对土壤侵蚀的敏感性以中敏感为主, 面积占比高达 70.30%, 高敏感影响区主要集中在北部风沙草滩区。农业措施对土壤侵蚀的敏感性总体较低, 不敏感和低敏感区面积之和占榆林市总面积的

65.77%, 高敏感区仅占 7.00%, 主要因为全市农业呈南北二大区域布局, 北部风沙滩区灌溉农业较为发达, 南部丘陵区主要是旱作农业区。受人口密度和社会经济活动的影响, 社会经济措施因子对土壤侵蚀的影响各程度分布较均, 高敏感区主要集中在东北部府谷和神木两县, 中敏感区主要集中在榆阳区和靖边县, 而南部的县社会经济措施敏感性程度总体较低。

表 1 榆林市各评价因子对土壤侵蚀敏感性影响程度分级标准

指标		不敏感	低敏感	中敏感	高敏感
R	降雨侵蚀力/[$(\text{MJ} \cdot \text{mm}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$]	<500	500~800	800~1200	>1200
K	土壤类型	水稻土、沼泽土	新积土、潮土	红土、黑垆土、栗钙土、灰钙土	黄绵土、紫色土、风沙土、粗骨土、盐土
T	地形起伏度	<20	20~50	50~100	>100
B	土地利用类型	水域、建设用地、沼泽地	林地、高盖度草地、水田	旱地、中盖度草地	低盖度草地、自然保留地(沼泽地除外)
P	植被指数	>0.6	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
	坡度/(°)	<3	3~9	9~17	>17
	农业措施	0.55	0.6	0.65	0.75
E	人口密度/(人· km^{-2})	<100	100~150	150~200	>200
	单位国土面积 GDP/(万元· km^{-2})	<200	200~250	250~300	>300
	赋值	1	3	5	7

表 2 榆林市单因子土壤侵蚀敏感性评价结果

分级	R		K		T		B		P		E	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
不敏感	1894.51	4.44	4508.39	10.55	10235	23.96	89.47	0.21	14369.12	33.64	11920.63	27.91
低敏感	1910.37	4.47	2081.39	4.87	4776.1	11.18	5300.76	12.4	13723.77	32.13	8378.4	19.62
中敏感	22592.78	52.89	3167.62	7.42	16499.18	38.63	30026.34	70.30	11629.38	27.23	11783.09	27.59
高敏感	16316.28	38.20	32956.54	77.16	11203.67	26.23	7297.37	17.08	2991.68	7.00	10631.83	24.89

3.2 综合敏感性评价

由表 3 可知, 榆林市土壤侵蚀以中敏感(20 160.58 km^2)、低敏感(11 915.39 km^2)和高敏感(9 663.57 km^2)为主, 所占比例分别为 47.20%、27.90%和 22.62%。榆林市土壤侵蚀敏感性空间分异规律与气候条件、地形地貌特征相似, 总体上北部地区土壤侵蚀敏感性程度低于南部。高敏感区主要集中在靖边、定边县南端, 东部黄河沿岸以及中部和南部的沟壑区; 古长城以北风沙草滩区土壤侵蚀敏感性总体较低, 西部定边和靖边的北部地区甚至为土壤侵蚀不敏感区。从各县情况来看, 绥德县、米脂县、子洲县和吴堡县土壤侵蚀敏感性程度较大, 高敏感区面积占本区总面积的比例均在 40%以上, 其中吴堡县高敏感区面积比例达到了 50%以上。北六县土壤侵蚀敏感性按占本区面积比例总体较南六县低, 但神木县、靖边县和定边县实际面积却均达到了 1 000 km^2 以上(表 4)。

总的来说, 榆林市土壤侵蚀主要以中敏感为主, 古长城以南的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀敏感性程度较高, 古长城以北的风沙草滩区相对较低。该结论与前人研究的榆林市土壤侵蚀现状^[4-8, 15, 16, 20]趋于一致, 说明降雨、地形、土壤可蚀性等自然因素以及生物措

施、农业措施和社会经济措施等人为因素均对土壤侵蚀有着重要影响, 尤其是人口密度和 GDP 两指标的加入, 社会经济活动对土壤侵蚀敏感性的影响得到较好的体现。榆林市土壤侵蚀高敏感区主要集中在黄土沟壑区, 区内坡陡、土质松散, 植被覆盖度低, 耕地以坡耕地居多, 抗蚀能力弱, 极易造成土壤侵蚀, 应将高敏感区纳入水土流失规划和生态治理优先区进行重点治理和恢复, 加大力度实施退耕还林和天然林保护工程, 防止土壤侵蚀强度进一步加剧; 中敏感区大多位于黄土丘陵向荒漠化的过渡区, 区内社会经济活动强烈, 人为干扰强度较大, 应积极调整农业产业结构, 注重社会效益和生态效益的协同共生, 避免过度频繁的人类活动破坏地表引发新的灾害; 低敏感和不敏感区主要位于北部风沙草滩区, 地形相对平坦, 主要以草地、沙地和湖泊覆盖为主, 灌溉农业较为发达, 土壤潜在侵蚀可能性较小, 应以预防为主, 严格控制不合理的工程施工造成新的水土流失。

表 3 榆林市土壤侵蚀综合敏感性评价结果

分级	不敏感	低敏感	中敏感	高敏感
面积/ km^2	974.40	11915.39	20160.58	9663.57
占比/%	2.28	27.90	47.20	22.62

表 4 榆林市各区县土壤侵蚀敏感性分布情况

区县	不敏感		低敏感		中敏感		高敏感		合计
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
榆阳区	36.85	0.54	4653.58	67.82	1828.79	26.65	375.98	5.48	6861.42
神木县	28.40	0.38	2506.18	33.68	3531.08	47.45	1405.93	18.89	7440.95
府谷县	3.20	0.10	142.56	4.47	2528.65	79.25	496.83	15.57	3190.88
横山县	30.39	0.72	714.95	16.88	3084.99	72.84	438.51	10.35	4235.09
靖边县	132.69	2.70	1245.80	25.31	1555.46	31.60	1950.30	39.63	4921.67
定边县	740.55	10.87	2579.33	37.84	2091.08	30.68	1357.62	19.92	6815.67
绥德县	0.10	0.01	16.65	0.93	949.15	53.27	832.47	46.72	1781.68
米脂县	2.21	0.19	18.15	1.56	689.54	59.22	467.07	40.11	1164.45
佳县	0.00	0.00	20.69	1.05	1562.00	79.45	394.31	20.06	1966.02
吴堡县	0.00	0.00	0.83	0.21	188.65	47.37	202.31	50.80	398.27
清涧县	0.00	0.00	6.94	0.37	1110.13	58.53	756.62	39.89	1896.69
子洲县	0.00	0.00	9.74	0.48	1041.06	51.00	985.60	48.29	2041.16
合计	974.40	2.28	11915.39	27.90	20160.58	47.20	9663.58	22.62	42713.94

4 结 论

本文以通用水土流失方程为基础,从自然和社会经济两个方面构建评估指标体系,综合研究了榆林市土壤侵蚀敏感性空间分异特征。研究区土壤侵蚀主要以中敏感为主,高敏感和低敏感次之,不敏感区仅有少量分布;空间分布上,古长城以北的风沙草滩区土壤侵蚀敏感性程度较低,而古长城以南的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀敏感性程度较高,主要集中在绥德县、米脂县、子洲县和吴堡县。土壤侵蚀对各因子影响最突出的是土壤侵蚀力,高敏感性面积占比达 77.16%,而对生物措施和农业措施相对较弱,高敏感性面积占比不到 20%,主要原因因为南部丘陵沟壑水蚀区覆盖大面积结构疏松、孔隙性大和富含碳酸钙的新黄土和老黄土,土壤侵蚀极为严重。值得注意的是,自然因素虽然是土壤侵蚀发生、发展的潜在条件,而人类活动是土壤侵蚀发生、发展或减弱的主导因素。因此,急需转变不合理的土地利用方式,加强植被保护保育和水土流失治理,对不同敏感区实施分区管理。

USLE 作为经验统计模型具有广泛的应用性,结合遥感和 GIS 分析能够简单、直观、方便和快速的对土壤侵蚀敏感性进行定量分析,极大地提高了分析效率,对于大范围尺度的土壤侵蚀敏感性空间分异规律研究具有较好的适用性。但在地形条件复杂的地区,精度误差仍需进一步提高。单因子敏感性评价中,仅土壤侵蚀力敏感性被充分识别,地形因子与生物措施因子没被凸显出来,这一点与榆林市土壤侵蚀实际情况有一定偏差,降水侵蚀力评价精度也受到站点数量和空间插值精度的影响。此外,土壤侵蚀强度分级标准因其广泛适用性,不能充分反映当地土壤侵蚀的真实状况,有待于根据研究区实际情况制定更加符合当

地实际情况的分级标准。土壤侵蚀是一个复杂的过程,影响因素众多,空间差异显著,如何提高模型的预测精度,以及评价因子选取的客观性和全面性等方面,都是土壤侵蚀敏感性评价需要深入研究的内容。

参考文献:

[1] 杨强. 基于遥感的榆林地区生态脆弱性研究[D]. 南京: 南京大学,2012.

[2] 王晓峰. 基于 GIS 和 RS 榆林地区生态安全动态综合评价[D]. 西安:陕西师范大学,2007.

[3] 刘晓琼,刘彦随. 基于 AHP 的生态脆弱区可持续发展评价研究:以陕西省榆林市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2009,23(5):19-23.

[4] 卓静,郭伟,邓凤东,等. 基于 GIS/RS 的榆林市土地利用时空格局动态分析[J]. 水土保持通报,2013,33(1): 271-274.

[5] 贾文锦,朱全有,陈有治,等. 榆林专区的土壤侵蚀及其防治(二)[J]. 土壤通报,1961(2):5-9.

[6] 郝慧梅,任志远. 区域 LUCC 的土壤侵蚀响应研究:以榆林市为例[J]. 干旱区研究,2008,25(4):583-591.

[7] 李奎,岳大鹏,刘鹏,等. 基于 GIS 与 RUSLE 的榆林市土壤侵蚀空间分布研究[J]. 水土保持通报,2014,34(6):172-178,371.

[8] 李柏延,任志远,易浪. 2001—2010 年榆林市土壤侵蚀动态变化趋势[J]. 干旱区研究,2015,32(5):918-925.

[9] 陈燕红,潘文斌,蔡莞篪. 基于 RUSLE 的流域土壤侵蚀敏感性评价:以福建省吉溪流域为例[J]. 山地学报, 2007,25(4):490-496.

[10] 王小丹,钟祥浩,范建容. 西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J]. 地理学报,2004,59(2):183-188.

[11] 曾旭婧,张毅,黄素萍,等. 定量遥感支持下的岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J]. 土壤通报,2014(4):953-960.

[12] 程先富,余芬. 安徽省土壤侵蚀空间分布及其与环境因子的关系[J]. 地理研究,2010,29(8):1461-1470.

育状况,其生根能力也会大幅度降低,进而抑制羊柴根系大范围地吸收水分与养分;除此之外,其分支强度也会降低,采取减少根系分叉数的策略以降低根系内部的交叠重复,避免细根营养物质的竞争^[14]。而多效唑处理则会促进根系的生长,减缓盐碱胁迫对其带来的伤害,且作用效果基本表现为浓度越高,改善效果越强,浓度为 600 mg/L 的多效唑对盐碱胁迫下羊柴根系形态生长的促进作用最好,今后在盐碱程度严重的地区,建议选用 600 mg/L 的多效唑提高羊柴抗盐碱性能,进而促进盐碱地区植物建设与恢复工作的完成。本研究结果与前人研究结果基本一致^[8]。在多效唑调控植物根系形态特征的适宜浓度方面,各研究结果不尽相同^[20-21],分析造成差异的原因可能是植物种类、苗龄及健壮程度不同、多效唑种类、盐胁迫成分组成、施盐时间及气温不同所致。

4 结论

(1) 重度盐碱胁迫会显著抑制羊柴根系的生长($p < 0.05$),阻碍羊柴根系的伸长生长,降低羊柴分支强度及根系与土壤的结合面积。

(2) 多效唑处理会促进羊柴根系的生长,减缓盐碱胁迫对其带来的伤害,且作用效果与多效唑浓度基本呈正相关关系,即浓度越高,改善效果越好。

参考文献:

- [1] 白冬梅,于智忠,李凤琴,等. 内蒙古毛乌素沙地近年荒漠化动态研究[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 68-73.
- [2] 蔺娟,地里拜尔·苏力坦. 土壤盐渍化的研究进展[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2007, 24(3): 318-323, 328.
- [3] 尹勤瑞. 盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [4] 朱金方,刘京涛,陆兆华,等. 盐胁迫对中国怪柳幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5140-5146.
- [5] 周秀梅,李保印,汪家哲. 多效唑在冷季型草坪上的应用效果[J]. 河南农业科学, 2004(4): 59-60.
- [6] 王宇灵,白小明,罗仁峰,等. 多效唑对多年生黑麦草扩展性和根系特性的影响[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6):

1319-1324.

- [7] 毛铁清,陈健妙,郑青松,等. 多效唑浸种对盐胁迫下麻疯树幼苗光合作用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3): 403-407.
- [8] 陈兰,黄广远. 多效唑对盐胁迫下高羊茅耐盐性的作用[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 177-180.
- [9] 白小明,相斐,罗仁峰,等. 多效唑对高羊茅扩展性和根系特性的调控效应[J]. 草业科学, 2009, 26(10): 171-176.
- [10] 张惠,张泽宁,刘妹玲. 毛乌素沙地樟子松造林效果对土壤盐渍化程度的响应[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(1): 44-48.
- [11] 宋云民. 毛乌素沙地主要树种水分特征及植被恢复模式研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [12] Wang G, Fahey T J, Xue S. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, west China[J]. *Oecologia*, 2013, 171(2): 583-590.
- [13] 姜琳琳,韩立思,韩晓日,等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 247-253.
- [14] 郑慧玲,赵成章,徐婷,等. 红砂根系分叉数和分支角度权衡关系的坡向差异[J]. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1062-1070.
- [15] 姜慧敏,宝音陶格涛. 黄花苜蓿根系生长特征研究[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 53-57.
- [16] 王家顺,李志友. 干旱胁迫对茶树根系形态特征的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(9): 55-57.
- [17] 童辉,孙锦,郭世荣,等. 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗根系形态及活力的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(3): 37-41.
- [18] 姚静,施卫明. 盐胁迫对番茄根形态和幼苗生长的影响[J]. 土壤, 2008, 40(2): 279-282.
- [19] 杨敏,汪季,高君亮,等. 植物生长延缓剂对盆栽柠条根系形态的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(2): 300-304.
- [20] 朱永友,王治. PP₃₃₃ 复合剂对高羊茅生长发育和生理效应的影响[J]. 草业科学, 2000, 17(4): 70-73.
- [21] 杨文权,寇建村,刘勇,等. 多效唑对 2 种冷季型草坪草生长的影响[J]. 草业科学, 2008, 25(11): 117-119.

(上接第 186 页)

- [13] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256.
- [14] 王万中,张宪奎. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(D)[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 7-18.
- [15] 殷水清,谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 29-33.
- [16] 李静,刘志红,李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 124-127.

- [17] 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.
- [18] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [19] 李月臣,刘春霞,赵纯勇,等. 三峡库区(重庆段)土壤侵蚀敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 788-796.
- [20] 张科利,蔡永明,刘宝元,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1687-1695.