

# 植被覆盖和降雨因子变化及对东北黑土区土壤侵蚀的影响

王硕<sup>1</sup>, 方海燕<sup>2,3</sup>, 和继军<sup>1</sup>

(1.首都师范大学 城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 2.中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3.中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** [目的] 研究东北黑土区植被覆盖和降雨侵蚀力因子对土壤侵蚀时空变化的影响程度, 为该区水土流失治理和可持续发展提供科学依据。[方法] 运用修正后的通用土壤流失方程 (RUSLE) 得到了 2000—2018 年东北黑土区土壤侵蚀分布特征, 并探究土壤侵蚀模数与因子时空分布变化规律, 得出侵蚀模数对于植被覆盖和降雨侵蚀力因子变化的敏感性。[结果] 黑土区土壤侵蚀变化与植被覆盖与管理因子和降雨侵蚀力因子的变化相关。研究期间侵蚀模数从 1 175.20 t/(km<sup>2</sup>·a) 下降至 822.07 t/(km<sup>2</sup>·a), 并且全区主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主, 空间上呈现西南向东北逐渐降低的空间分布特点。[结论] 东北黑土区东南部和西南部的植被覆盖与管理因子 (C) 敏感系数分别为 0.95 和 1.00, 是强度敏感区域, 提高植被覆盖度将成为有效治理手段; 西北与西南降雨侵蚀力因子 (R) 敏感系数分别为 0.45 和 1.00, 为中度敏感和强度敏感的区域, 降低降雨的影响对治理侵蚀最为有效。

**关键词:** 植被覆盖; 降雨变化; 土壤侵蚀; 时空变化; 东北黑土区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)02-0066-10

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 王硕, 方海燕, 和继军. 植被覆盖和降雨因子变化及对东北黑土区土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 66-75. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.009; Wang Shuo, Fang Haiyan, He Jijun. Effects of variation in vegetation cover and rainfall on soil erosion in black soil region, Northeastern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 66-75.

## Effects of Variation in Vegetation Cover and Rainfall on Soil Erosion in Black Soil Region, Northeastern China

Wang Shuo<sup>1</sup>, Fang Haiyan<sup>2,3</sup>, He Jijun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Numerical Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of vegetation cover and rainfall erosivity on the spatial and temporal changes of soil erosion in the black soil region of Northeast China were studied, in order to provide a scientific basis for soil and water conservation and sustainable development in this region. [Methods] The revised universal soil loss equation (RUSLE) was used to calculate soil erosion modulus and its distribution in the study region from 2000 to 2018, the spatial and temporal distribution of soil erosion modulus and the influencing factors were analyzed, and the sensitivity of the erosion modulus to changes of vegetation cover and rainfall factors was obtained. [Results] Soil erosion in the black soil region of Northeastern China was mainly affected by the changes in vegetation cover and management factor *C* and rainfall erosivity factor *R*. The erosion modulus in the study area decreased from 1 175.20 t/(km<sup>2</sup>·a) to 822.07 t/(km<sup>2</sup>·a) during 2000—2018, and slight and mild erosion dominated, with a spatial distribution from southwestern to northeastern parts of

收稿日期: 2020-11-10

修回日期: 2021-01-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“黑土区不同坡形坡耕地侵蚀及其对降雨和水保措施响应”(41977066)

第一作者: 王硕(1996—), 男(壮族), 广西壮族自治区南宁市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与 GIS 应用。Email: 2190902175@cnu.edu.cn.

通讯作者: 方海燕(1977—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: fanghy@igsrr.ac.cn.

the black soil region. [Conclusion] The sensitivity coefficients of vegetation cover and management factor ( $C$ ) are 0.95 and 1.00 in the southeast and southwest of the black soil region, which belong to intensely sensitive areas. In these places, the effective management method is to improve the vegetation cover. In contrast, the sensitivity coefficients of rainfall erosion force factor ( $R$ ) are 0.45 and 1.00 in the northwestern and southwestern parts, which belong to moderately and intense sensitive areas, where the effective way to control soil loss is to reduce the impact of rainfall.

**Keywords:** vegetation cover; changes in rainfall; soil erosion; temporal and spatial variation; the black soil region of Northeastern China

土壤侵蚀是世界性的环境问题之一<sup>[1]</sup>,其不仅破坏土地资源,降低土壤肥力,还会诱发洪涝灾害,严重影响生态环境和可持续发展<sup>[2]</sup>。因此,探索土壤侵蚀变化的原因,成为控制水土流失的关键。20 世纪 Wischmeier<sup>[3-4]</sup>建立了通用土壤流失方程(USLE),该方程将诸多影响土壤侵蚀速率的物理和管理因素归纳为 6 个主要因子,分别为降雨侵蚀力因子  $R$ ,土壤可蚀性因子  $K$ ,坡度坡长因子  $LS$ ,植被覆盖与管理因子  $C$  和水土保持措施因子  $P$ 。近些年来,全球气候变化开始对土壤侵蚀产生影响,同时大规模的人为活动在加重土壤侵蚀的产生<sup>[5]</sup>。国内外都开展了这方面的工作,例如 Teng<sup>[6]</sup>和 Chakraborty<sup>[7]</sup>曾在青藏高原和印度东部研究气候变化影响下的土壤侵蚀,吴昌广<sup>[8]</sup>和余新晓<sup>[9]</sup>也曾结合降雨侵蚀力与植被覆盖因子在三峡与黄土区进行土壤侵蚀研究,最终表明植被覆盖和降雨侵蚀力因子已成为影响土壤侵蚀变化的两个关键因素。

东北黑土区是中国重要的商品粮基地<sup>[10]</sup>,素有“北大荒”之称。然而由于黑土区独特的地理环境<sup>[11]</sup>,不合理的开垦耕作<sup>[12]</sup>以及近些年气候变暖的影响,使得黑土区内植被覆盖率和降雨发生了巨大变化<sup>[13]</sup>,最终导致其水土流失现象日益突出。许多研究者<sup>[14-16]</sup>曾采用 RUSLE 模型,在东北黑土区的诸多区域开展过工作。然而以往开展的工作中,单因子变化对侵蚀造成影响的研究相对较少,特别是基于植被覆盖和降雨因子变化对整个黑土区侵蚀影响的研究更是未见报道。近 20 a,该区域植被覆盖率和降雨量变化较大,因此有必要针对这些变化的影响程度进行探讨,有利于揭示东北黑土区土壤侵蚀的空间变化特征,对于深化该区的土壤侵蚀研究更具深远意义。因此,本文利用气象、遥感等资料,采用 RUSLE 模型估算土壤侵蚀,并将东北黑土区划分为 6 个区域,从时空角度结合降雨侵蚀力因子、植被覆盖与管理因子变化来揭示土壤侵蚀空间差异及其对降雨侵蚀力和植被覆盖变化的敏感性,进而为水土保持规划提供数据支持。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

东北黑土区(38°42′—53°36′,115°24′—135°12′)包括黑龙江、吉林、辽宁及内蒙古东北部地区,总面积约为  $1.24 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,海拔在 0~2 667 m 之间。大兴安岭、小兴安岭和长白山分别坐落于研究区的西部、东北和东南,辽河平原、松嫩平原、三江平原三大平原位于三大山脉之间并且由南至北排开,辽河、嫩江、松花江流淌其中。研究区属于温带季风气候,四季分明。近 40 a 年均降雨量由东南部的 900 mm 衰减至西北部的 300 mm 左右,近 70% 降水来自夏季。研究区主要有黑土、黑钙土、潮土、白浆土等土壤类型。山区以森林为主,平原地区以耕地为主。为了方便研究区进行描述,本文依据松嫩平原区域、嫩江、松花江及辽河等地势与水系为边界,将研究区分为 6 个区域,分别为辽东半岛及长白山南部(I 区)、三江平原及长白山北部(II 区)、小兴安岭(III 区)、蒙古北部和大兴安岭北部(IV 区)、辽河平原及大兴安岭中南部(V 区)及松嫩平原(VI 区)。

### 1.2 数据来源

本文 2000,2005,2010,2015 和 2018 年  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的日降雨数据来自国家气象科学中心。土壤数据来自联合国粮食与农业组织 The Harmonized World Soil Database (HWSD)。数字高程影像(DEM; 90 m 分辨率)数据来源于中国科学院地理空间数据云平台。2000,2005,2010,2015 和 2018 年归一化植被指数(NDVI)与土地利用数据(100 m 分辨率)均来自中国科学院资源环境科学数据中心。

### 1.3 研究方法

由于本研究区较大,RUSLE 模型相比于 CSLE 模型而言其参数更易获取,且该模型已经在其他大尺度地区成功开展过工作, $C, P$  因子能有所借鉴。因此本文采用 RUSLE 模型计算土壤侵蚀强度,表达式为:

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

式中: $A$  为年土壤侵蚀模数(t/hm<sup>2</sup>·a);  $R$  为降雨侵

蚀力因子 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$ ;  $L$  为坡长因子(无单位);  $S$  为坡度因子(无单位);  $C$  为植被覆盖与管理因子(无单位);  $P$  为水土保持措施因子。

1.3.1 降雨侵蚀力  $R$  因子  $R$  值反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。章文波<sup>[17]</sup>指出我国东北地区利用逐日降雨数据计算  $R$  值精度较高。因而,本研究采用日降雨数据计算  $R$  值:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j)^\beta \quad (2)$$

式中: $M_i$  为第  $i$  个半月时段的侵蚀力值 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$ ;  $K$  为该半月时段内的天数;  $D_j$  为半月时段内第  $j$  天的侵蚀性日雨量,要求日雨量大于 12 mm,否则以 0 计算;  $\alpha, \beta$  为模型的待定系数。

$$\beta = 0.813\ 63 + 18.144 \times P_{d12}^{-1} + 244.455 \times P_{y12}^{-1} \quad (3)$$

$$\alpha = 21\ 568 \times \beta^{-7.189} \quad (4)$$

式中: $P_{d12}$  为  $\geq 12$  mm 的日平均雨量(mm);  $P_{y12}$  为  $\geq 12$  mm 的年平均雨量(mm)。通过以上方法计算  $R$  并对其插值<sup>[18]</sup>,最终得到  $R$  值分布。

1.3.2 土壤可蚀性  $K$  因子 张科利<sup>[19]</sup>表明修正后的 EPIC 模型在我国东北地区适用性较好。因此本研究通过 Sharpley<sup>[20]</sup>和 Williams<sup>[21]</sup>提出的 EPIC 模型方法,再结合张科利修正公式进行计算:

$$K_{epic} = \{0.2 + 0.3e^{[-0.025\ 6S_{AN}(1.0 - \frac{S_{IL}}{100})^3]}\} \times \left(\frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.72 - 2.95C)}}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + e^{(22.9SN_1 - 5.51)}}\right] \quad (5)$$

$$K = 0.515\ 75 \times K_{epic} - 0.013\ 83 \quad (6)$$

式中: $K_{epic}$  为修正前的  $K$  因子;  $C_{LA}, S_{IL}, S_{AN}$  分别为土壤黏粒,粉粒和砂粒含量(%);  $C$  为有机碳含量(%);  $SN_1 = 1 - S_{AN}/100$ 。

1.3.3 坡度坡长  $LS$  因子  $LS$  反映地貌特征对土壤侵蚀的影响。考虑到我国东北地势起伏,而 RUSLE 是美国农业部以美国缓坡农用地为对象建立的。因此,本研究采用 Liu<sup>[22-23]</sup>提出基于我国陡坡的  $LS$  因子修正方法:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta \leq 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.05 & (5^\circ < \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

$$L = (\lambda/22.1)^m, m = \begin{cases} 0.2 & (\text{if } \theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (\text{if } 1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (\text{if } 3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\text{if } \theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\lambda$  为坡长(m);  $\theta$  为坡度( $^\circ$ )。

1.3.4 植被覆盖与管理  $C$  因子 由于研究区较大,

植被覆盖度变化于 0%~76%,为避免出现斑块化结果和准确获取  $C$  值,经参考黑土区相关文献<sup>[24-25]</sup>后采用蔡崇法<sup>[26]</sup>建立的  $C$  值模型计算  $C$  因子值。计算方法为:

$$C = \begin{cases} 1 & (c = 0) \\ 0.650\ 8 - 0.343\ 6\log_{10} & (0 < c < 78.3\%) \\ 0 & (c \geq 78.3\%) \end{cases} \quad (9)$$

$$c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (10)$$

式中: $c$  为植被覆盖度;  $NDVI$  为归一化植被指数;  $NDVI_{\max}$  为研究区全植被覆盖的  $NDVI$  值;  $NDVI_{\min}$  为全裸地或无植被覆盖的  $NDVI$  值。

1.3.5 水土保持措施  $P$  因子 根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》,规定  $< 3^\circ$  坡耕地实施等高改垄;  $3^\circ \sim 5^\circ$  坡耕地采取地埂植物带;  $> 5^\circ$  修筑梯田; 研究区内的坡耕地进行了大规模治理<sup>[28]</sup>。根据相关文献<sup>[29]</sup>赋值方法,最终将水域区  $P$  值取 0,梯田  $P$  值为 0.03,等高改垄与地埂植物带的旱田  $P$  值取 0.352,顺耕耕作的农田及其他自然植被区  $P$  值取 1。

#### 1.4 敏感系数

本文采用敏感系数法来衡量侵蚀模数对因子变化的敏感程度。计算公式为:

$$Q = \frac{\Delta A}{\Delta X} \quad (11)$$

式中: $Q$  为敏感度,表示侵蚀模数在影响因子变动下的变化快慢,数值越大敏感性越强;  $\Delta A$  为侵蚀模数年均变化量;  $\Delta X$  为影响因子的年均变化量。

$$\Delta A = \frac{A_2 - A_1}{T} \quad (12)$$

$$\Delta X = \frac{X_2 - X_1}{T} \quad (13)$$

式中: $A_1$  为研究期第一年的侵蚀模数;  $A_2$  为研究期最后一年的侵蚀模数;  $X_1$  为研究期第一年的平均因子数值;  $X_2$  为研究期最后一年的平均因子数值;  $T$  为研究期时间跨度(a)。

为了消除数量级的影响,将敏感度进行标准化处理:

$$M = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (14)$$

式中: $M$  为标准化敏感度,即敏感系数;  $Q_{\max}$  为区域内敏感度最大值;  $Q_{\min}$  区域敏感度最小值。敏感系数分级<sup>[30]</sup>详见表 1。

表 1 土壤侵蚀敏感系数的分级

敏感因子	敏感等级				
	不敏感	弱	中度	较强	强
$C$ 值	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1
$R$ 值	0~0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1

## 1.5 数据处理

本文借助 ArcGIS 10.2 软件,利用 2000,2005,2010,2015 和 2018 年 5 期 C 因子与其他各因子的多年平均值进行运算,得到 C 因子变化下土壤侵蚀模数;同理,利用 2000,2005,2010,2015 和 2018 年 5 期 R 因子数据得到 R 因子变化下的土壤侵蚀模数;再结合 5 期对应年份的各个因子数据,得到研究区内各个年份的土壤侵蚀模数。最后根据水利部《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》,将土壤侵蚀模数进行

重分类,得到 C 因子变化下土壤侵蚀模数时空分布、降雨侵蚀力因子变化下的侵蚀模数分布和各个年份的土壤侵蚀模数分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟结果的验证

2.1.1 C 因子结果验证 本文采用的 C 值模型结果与张宪奎<sup>[27]</sup>和张雪花<sup>[16]</sup>的 C 因子赋值标准基本一致,因此该 C 值模型在东北黑土区可适用(表 2)。

表 2 C 因子结果验证对比

土地类型	林地	耕地	草地	灌木林
张宪奎 <sup>[27]</sup>	0.002~0.1	0.007~0.32	0.011~0.25	0.011~0.14
张雪花 <sup>[16]</sup>	0.001~0.032	0.148~0.341	0.003~0.14	0.003~0.12
本研究 C 范围	0.003~0.049	0.06~0.349	0.01~0.21	0.007~0.16
本研究平均值	0.038	0.19	0.086	0.07

2.1.2 侵蚀模数结果验证 在以往的研究中,东北黑土区采用<sup>137</sup>Cs 示踪、径流小区监测与模型估算等方法开展了侵蚀研究的相关工作。例如,方华军<sup>[31]</sup>、李国强<sup>[32]</sup>与张克新<sup>[33]</sup>同样采用<sup>137</sup>Cs 示踪法分别在松花江镇、拜泉县与辽东湾的得到了 220,245 与 1 739~3 892 t/(km<sup>2</sup>·a)的结果,与本研究所得的 187.62,237.46 与 2 568.57~4 323.36 t/(km<sup>2</sup>·a)的估算值相差不大;刘宝元<sup>[34]</sup>还在鹤山农场利用径流小区监测得到坡耕地的侵蚀模数为 845~1 157 t/(km<sup>2</sup>·a),对比所用数据为鹤山县的土壤侵蚀模数,因此小于径流小区结果。还

有盛美玲<sup>[35]</sup>利用 WATEM/SEDAM 模型在得到的 2005 年土壤侵蚀模数为 351.2 t/(km<sup>2</sup>·a),顾治家<sup>[36]</sup>利用 CSLE 模型得到的结果为 677 t/(km<sup>2</sup>·a),Fang<sup>[29]</sup>利用 RUSLE 模型在东北黑土区尺度下计算 2010 年的侵蚀模数为 943.7 t/(km<sup>2</sup>·a),本研究结果均与以上模型估算值相近(表 3)。本研究中土壤侵蚀模数偏小的原因可能来自两个方面,其一是当前所能获取的 NDVI 与土地利用数据分辨率过低平滑了数值<sup>[38]</sup>,降低了土壤侵蚀模数;其二则是研究时间和区域、以及赋值精细度不同所造成。

表 3 土壤侵蚀模数结果验证对比

研究区域	研究时段	研究方法	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	本研究侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	文献来源
松花江镇小流域	2011 年	<sup>137</sup> Cs 示踪法	220	187.62	方华军等 <sup>[31]</sup>
拜泉县	2000 年	<sup>137</sup> Cs 示踪法	245	237.46	李国强等 <sup>[32]</sup>
辽东湾	1958—2008 年	<sup>137</sup> Cs 示踪法	1 739~3 892	2 568.57~4 323.36	张克新等 <sup>[33]</sup>
鹤山农场坡耕地	2003—2004 年	径流小区监测	845~1157	383.76	刘宝元等 <sup>[34]</sup>
拜泉县	2005 年	WATEM/SEDAM 模型	351.2	340.81	盛美玲等 <sup>[35]</sup>
拜泉县	2016 年	CSLE 模型	677	641.47	顾治家等 <sup>[36]</sup>
克山县	2000 年	CSLE 模型	414.96	397.68	孙禹等 <sup>[37]</sup>
东北黑土区	2010 年	RUSLE 模型	943.7	905.75	方海燕等 <sup>[29]</sup>

## 2.2 RUSLE 各因子分布及变化特征

2.2.1 研究区 R 因子变化分布及变化特征 2000—2018 年 R 因子呈现先增加后降低再增加的趋势。空间上,R 因子由西南向东北部减少,区域上呈现: I > II > VI > III > V > IV 的分布特点(图 1)。从局部上看,I 区是 R 值最大区并且以丹东市为中心向四周降低。辽东半岛东侧与西侧受到长白山脉阻隔造成降雨量差距明显,其中 2018 年东西侧 R 值相差近

2 000 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。

在 II, III 和 VI 区 R 因子由 765.42 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)增至 1 417.79 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)。研究区内最小 R 值出现在 IV 和 V 区,该区 R 值稳定升高但变化幅度较小,呈现大兴安岭中部大于南北部的分布特点。

2.2.2 研究区 K 因子与 LS 因子变化分布及变化特征 研究区内 K 因子最高值分布在大兴安岭南

(V)和辽河平原北部(VI)内;最低值则出现在大兴安岭北部(IV)、辽河平原西南部(V)和松嫩平原(VI)。

研究区内  $LS$  因子的高值主要分布在三大山脉,研究区内的三大平原均由低值构成。

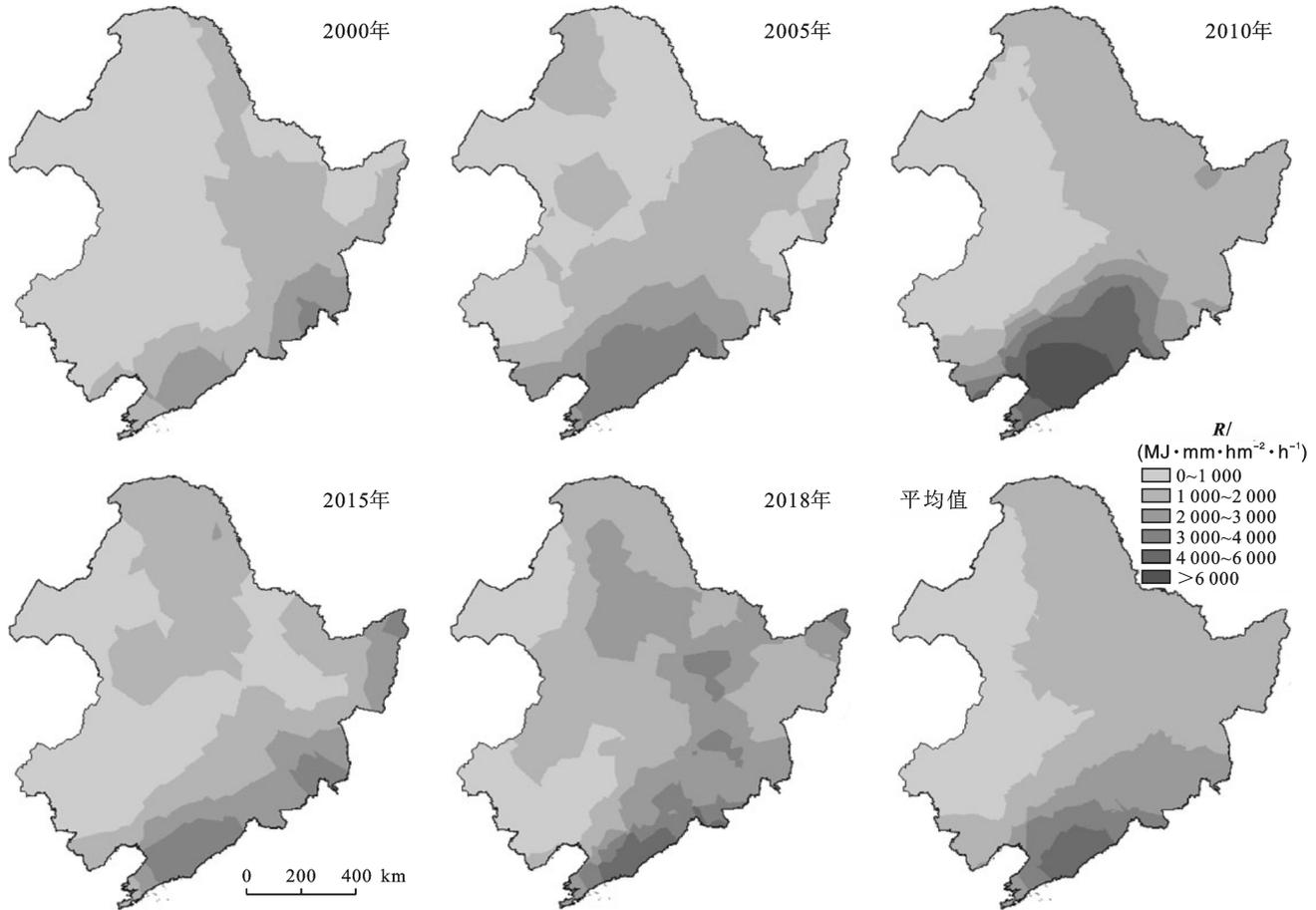


图 1 研究区各年份降雨侵蚀力因子分布

**2.2.3 研究区  $C$  因子变化分布及变化特征** 2000—2018 年  $C$  值降低了 42%, 呈现中部与西南部偏高, 东部与北部偏低的特征(图 2)。  $C$  因子的变化主要受夏季平均气温影响<sup>[39]</sup>。数据表明<sup>[40]</sup>, 2000—2011 年夏季平均气温持续升高, 而 2011 年后夏季平均气温开始稳定, 这趋势与  $C$  值变化曲线相吻合。  $C$  因子降低受政策因素的作用也不容忽视。随着三北防护林、退耕还林等工程的大规模实施, 东北全区植被覆盖面积出现了稳固的增加<sup>[41]</sup>。从局部看, VI 区受到政策因素影响  $C$  值呈下降趋势, 18 a 间  $C$  值小于 0.1 的面积占比由 27.29% 增至 69.62%, 为植被覆盖率增加最快的区域。 I, II, III 和 IV 区的  $C$  值处于持续降低的态势, 该范围曾经存在大量的高值区域 ( $C > 0.1$ ), 至 2010 年高值区域面积占比由 31.62% 下降至 12.23%, 这也与夏季平均气温的逐年升高息息相关。 V 区在研究期间  $C$  值低于 0.1 的面积占比总体增加了 34.12%。该区的  $C$  值与海拔高度的气温呈现负相关<sup>[42]</sup>, 在高海拔地区常年气温较低, 因此造成高海拔地区  $C$  值并未发生明显改变。

**2.2.4 研究区  $P$  因子变化分布及变化特征** 2000—2018 年平均  $P$  值变化率不足 1%, 且变化均出现于黑龙江的北部(IV)和大兴安岭南(V)。相比而言,  $C$  与  $R$  因子变化率都超过了 50%。因此, 本文仅考虑  $C$  因子与  $R$  因子对于东北黑土区土壤侵蚀模数变化的影响。

### 2.3 单因子变化下的土壤侵蚀时空特征

**2.3.1 研究区  $C$  因子变化下土壤侵蚀特征** 在  $C$  因子变化下, 2000—2018 年研究区土壤侵蚀模数持续降低, 呈现南部侵蚀严重、北部侵蚀轻微的特征(图 3 和表 4)。局部上看, 研究区内中部和北部主要以微轻度侵蚀为主。 II, III 和 IV 区侵蚀模数与  $C$  因子的年均变化量都较小, 敏感系数均小于 0.3, 属不敏感区域。 VI 区  $C$  因子年均变化量达 0.021, 高于全区的平均水平, 该因子大幅度下降势必导致该区侵蚀模数随之大幅度下降。根据敏感度计算公式, VI 区敏感度为 0, 属不敏感区域, 表明该区在单位植被覆盖度增加的情况下, 对侵蚀的缓解程度不明显。以上不敏感区域大部分处于地势平坦且土壤可蚀性较低的地区, 所以低值的  $K$  与  $LS$  因子削弱了植被覆盖对侵蚀变化的影响。

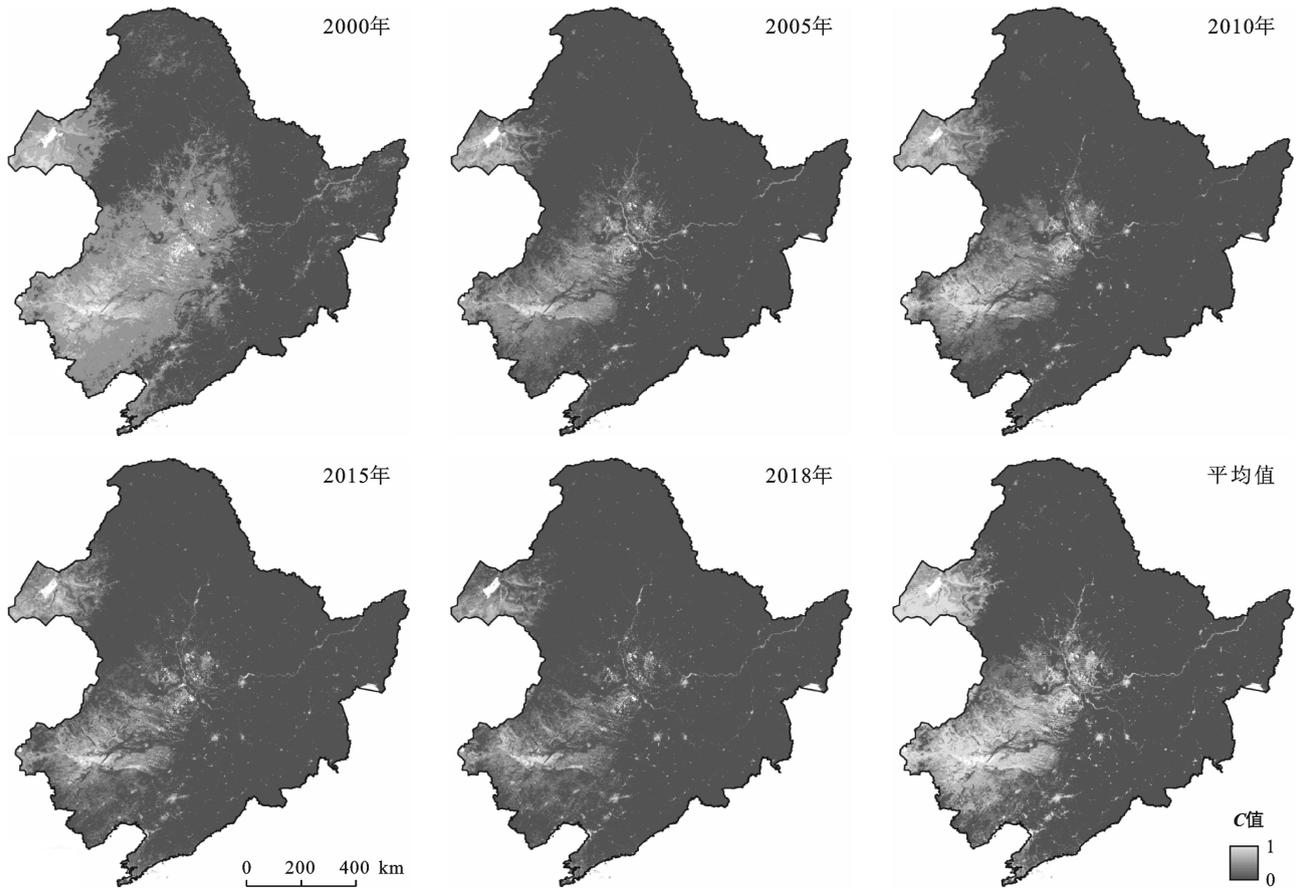


图 2 研究区各年份植被覆盖与管理因子分布

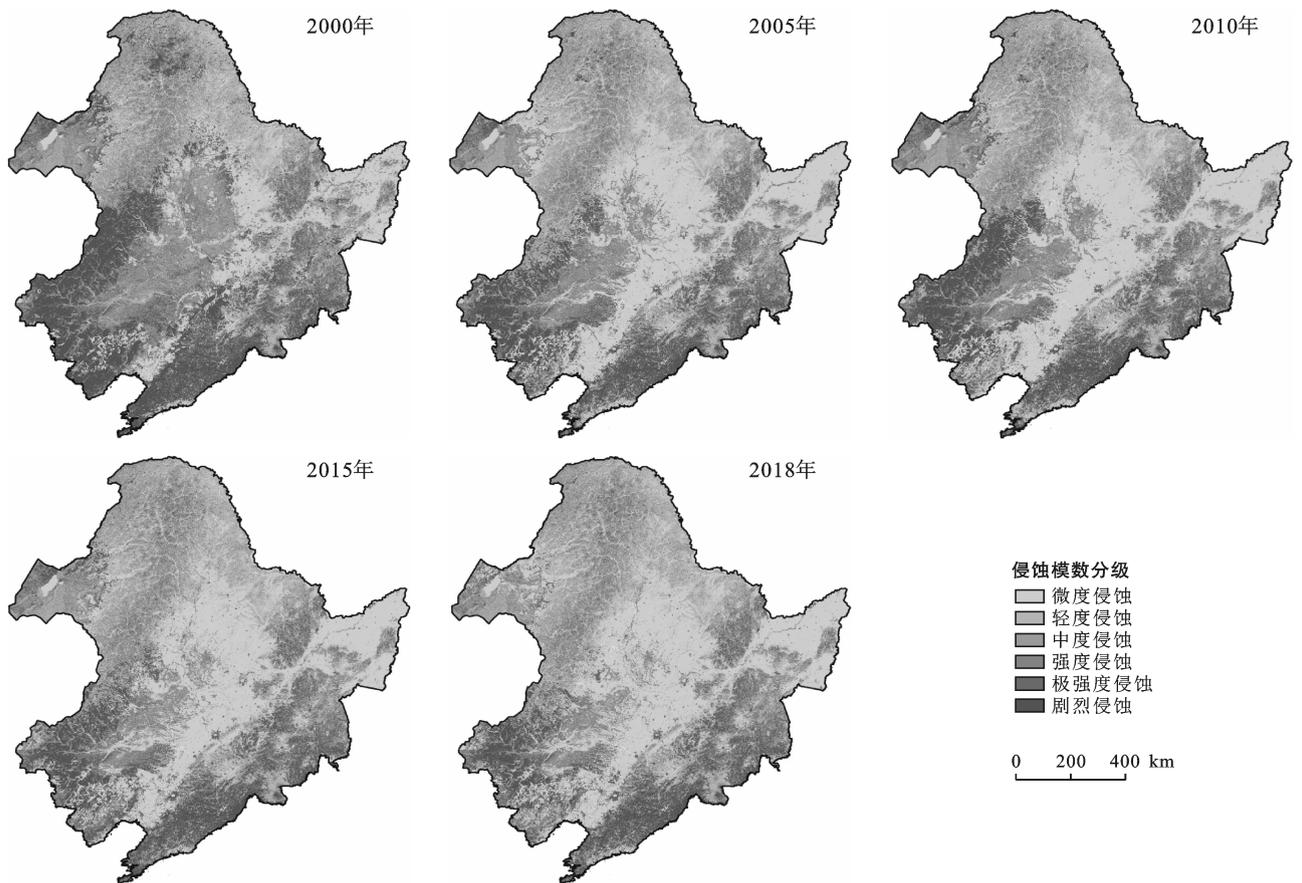


图 3 研究区 C 变化下的土壤侵蚀模数分布

土壤侵蚀最严重的区域为 I 与 V 区, 研究期间强度以上侵蚀向中度以下侵蚀转变的面积近 63 000 km<sup>2</sup>。这两个区域的 C 因子年均变化量仅为 VI 区的 1/2, 但其年均侵蚀变化量却为 VI 区的 3~4 倍, 分别达到了 -214.33 与 -271.31 t/(km<sup>2</sup> · a), 同时 I 与 V 区的敏感系数分别为 0.95 和 1.00, 是研究区内的两个强度敏感区域。I 区和 V 区分别坐落于长白山中南部与大兴安岭中南部, 地势陡峭, LS 值最大; 并且 I 区濒临渤海, 降雨充沛, R 值最大; 而 V 区是 K, P 值最高的区域。在其他因子值较高的情况下, C 因子若发生轻微变化, 势必会造成侵蚀模数发生较大的改变。因此应优先提高这两个区域的植被覆盖程度, 能够更为高效的减少土壤侵蚀。

2.3.2 R 因子变化下土壤侵蚀时空特征 2000—2018 年, 受 R 因子变化的影响, 土壤侵蚀模数呈现先增加后减少再增加的趋势, 空间上呈现西南部侵蚀严重, 东北部侵蚀轻微的特点(图 4 和表 5)。局部来看, I 区年均侵蚀增加量虽为全区最大的 69.81 t/(km<sup>2</sup> · a), 但该区的敏感系数仅为 0.08, 属不敏感区域。II, III 和 VI 区侵蚀模数变化小, 敏感系数均在 0.1 以下, 是

不敏感区域。以上 4 个区域不敏感的原因在于 C 因子较小, 较高的植被覆盖可有效拦截降雨, 减少降雨击溅侵蚀, 缓解强降雨对侵蚀造成的影响。在 R 因子偏低且浮动较小的 IV 和 V 区, 出现较严重的侵蚀和侵蚀强度变化, 敏感系数分别为 1.00 和 0.45, 属中度敏感和强度敏感。IV 和 V 区分布着大兴安岭与蒙古高原, 地势陡峭并且包含大量的 K, LS, C 和 P 因子的高值区域, 便造成这两个分区敏感。因此该区域应优先减少坡耕地, 实行免耕等耕作方式, 降低降雨对侵蚀所造成的影响。

表 4 研究区不同分区土壤侵蚀模数变化量与敏感系数

地区	年均侵蚀模数变化量/ (t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )	C 因子年均 变化量	敏感 系数	敏感 等级
区域 I	-214.33	-0.012	0.95	强度敏感
区域 II	-21.37	-0.003	0.23	不敏感
区域 III	-12.09	-0.002	0.16	不敏感
区域 IV	-37.23	-0.005	0.25	不敏感
区域 V	-271.31	-0.013	1.00	强度敏感
区域 VI	-73.71	-0.025	0.00	不敏感

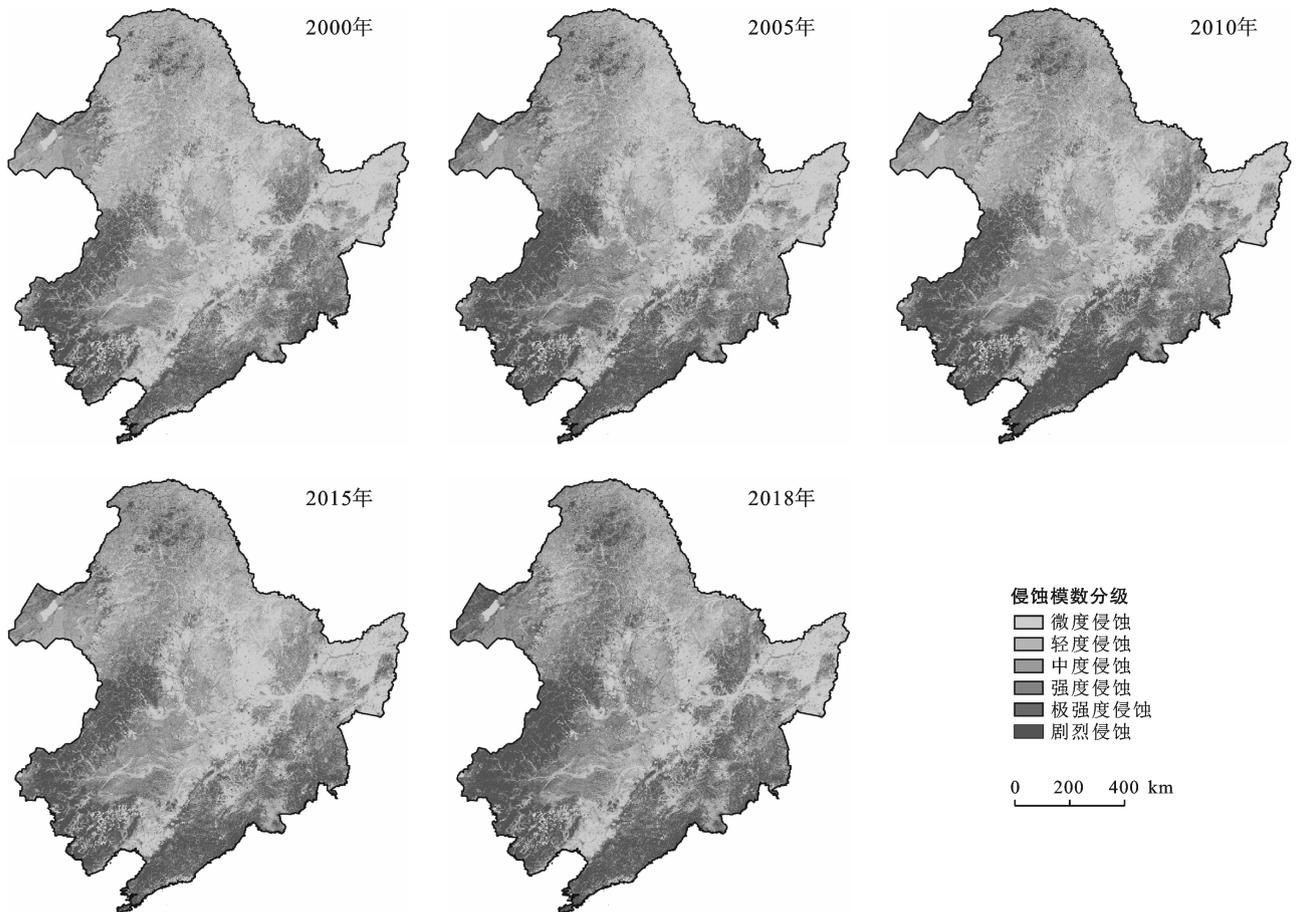


图 4 研究区 R 变化下的土壤侵蚀模数分布

表5 研究区内区域变化量与敏感系数

地区	年均侵蚀模数变化量/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	R 因子年均变化量/ ( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ )	敏感系数	敏感度等级
区域 I	69.81	86.38	0.08	不敏感
区域 II	7.89	31.34	0.00	不敏感
区域 III	17.82	55.61	0.01	不敏感
区域 IV	62.74	19.31	0.45	中度敏感
区域 V	187.63	27.34	1.00	强度敏感
区域 VI	19.84	42.86	0.03	不敏感

## 2.4 不同年份土壤侵蚀时空特征

研究期间东北黑土区年均侵蚀模数为  $893.53 t/(km^2 \cdot a)$ , 远超过该区的容许土壤流失量  $200 t/(km^2 \cdot a)$ 。I 和 V 区侵蚀较为严重, 其余地区属于微度侵蚀和轻度侵蚀且变化较小。从土壤侵蚀面积来看, 从 2000—2015 年研究区微度侵蚀面积占比增

加了 3.73%, 而中度以上侵蚀的面积占比缩幅为 3.84%, 说明研究区出现中度以上侵蚀向轻度侵蚀转移的迹象。从 2015—2018 年, 微度侵蚀面积缩小了  $55\,989.67 km^2$ , 轻度侵蚀面积增长了  $50\,462.60 km^2$ , 研究期后 3 a 出现微度向轻度以上侵蚀转移的情况 (图 5 和表 6)。

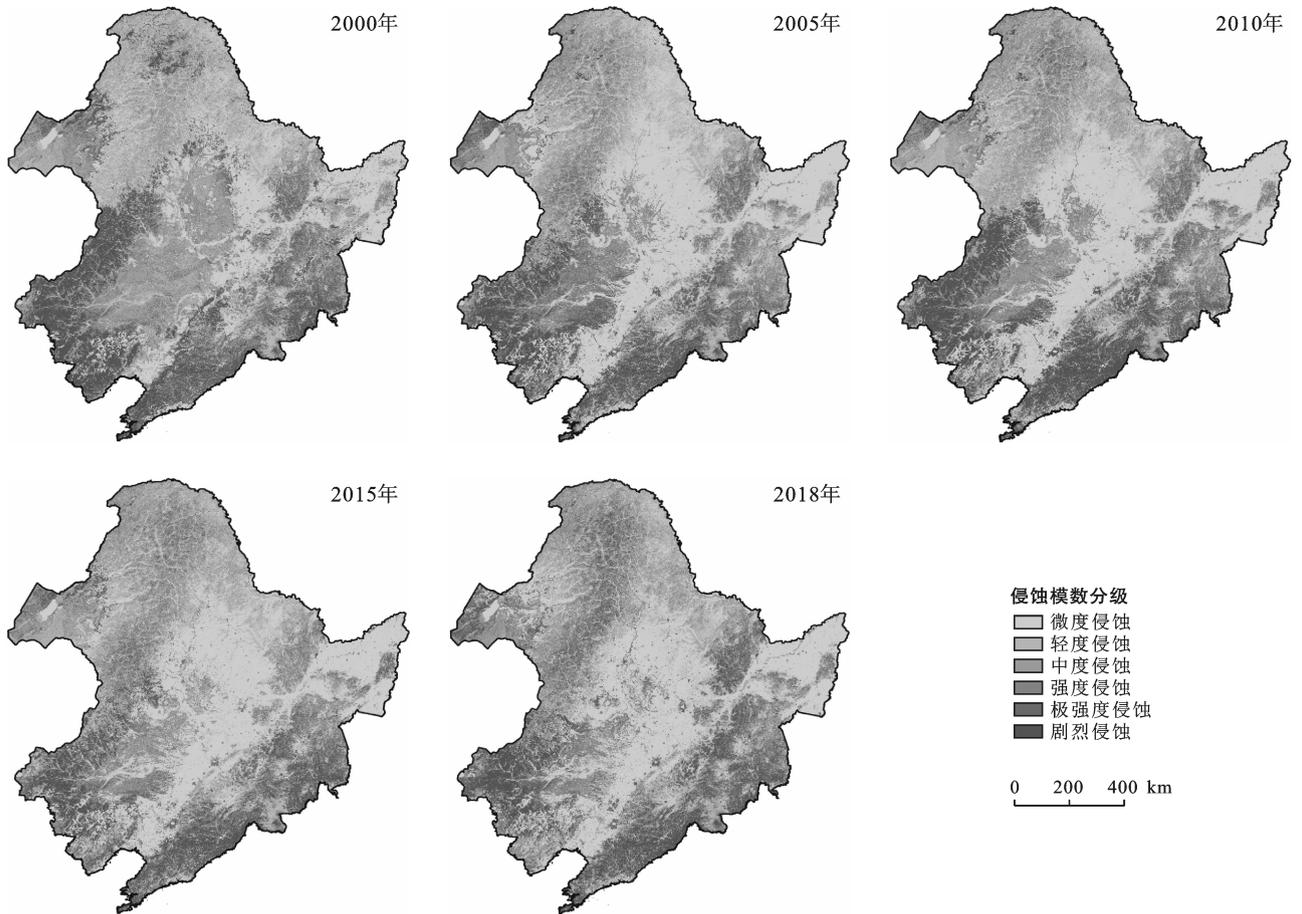


图5 研究区各年份的土壤侵蚀模数分布

从空间局部上看, 研究期间 I 区侵蚀模数呈现减弱趋势。极强度以上侵蚀面积由  $9\,914.18 km^2$  减少到  $1\,793.61 km^2$ 。该区侵蚀模数对 C 因子呈强度敏感, 研究期 C 因子由 0.53 下降至 0.17, 使该区土壤侵蚀强度降低。但其地处长白山南部, 地势陡峭, 濒临渤海, 常

年雨量大, 也使其侵蚀模数属于全区偏大的水平。

辽河平原 (V) 是极强度以上侵蚀的主要分布区, 侵蚀模数呈现先减后增的趋势。该区侵蚀对 C 因子与 R 因子皆为强度敏感。在 2000—2010 年, 该区 C 因子由 0.55 骤降至 0.19, 使得侵蚀得到极大改善。在

2010—2015 年,该区  $R$  值由  $2\ 634.83$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$  降至  $813.98$  ( $\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,

同样改善了侵蚀情况。2015 至 2018 年间, $C$  因子出现 30.44% 的回升,导致该区侵蚀模数的少量增加。

表 6 研究区各年份不同土壤侵蚀强度分级面积

土壤侵蚀模数分级	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
微度侵蚀	785 193.75	807 973.11	804 472.11	831 444.28	775 454.61
轻度侵蚀	358 381.28	372 621.48	355 441.28	359 255.93	409 718.53
中度侵蚀	31 243.79	20 467.88	32 331.35	19 217.99	20 277.46
强度侵蚀	21 797.52	12 685.24	16 583.28	11 580.39	11 144.63
极强度侵蚀	20 154.52	11 831.26	14 710.86	9 319.43	10 113.00
剧烈侵蚀	19 502.18	10 716.49	12 738.23	5 437.06	9 551.46
合计	1 238 273.04	1 238 270.46	1 238 277.11	1 238 270.08	1 238 277.69
平均模数	1 175.2	855.89	985.75	628.73	822.07

大兴安岭(V)地区属于对  $R$  与  $C$  因子敏感地区,呈现先增后减再增的趋势。2000 年强度以上侵蚀面积为  $27\ 848.86\ \text{km}^2$ ,后 10 a 侵蚀开始由大兴安岭南部长延至大兴安岭西南部,强度以上侵蚀面积达到  $34\ 475.68\ \text{km}^2$ ,占该年强度以上侵蚀总面积的 73.72%。前 10 a 中  $R$  因子增幅达 42.85%,导致该区侵蚀严重化;2010—2015 年,该区  $C$  与  $R$  值同时降低,改善了该区的侵蚀情况。2015—2018 年,该区  $R$  和  $C$  值同时增加,强度以上侵蚀面积再次出现增加,达到了  $24\ 753.39\ \text{km}^2$ ;这些年份尽管大兴安岭中部的侵蚀情况有所缓解,但大兴安岭南部长与内蒙古高原接壤地带仍是高侵蚀地带,这与该区陡峭的地形有关。

I 区和 V 区尽管侵蚀情况得到了相当大程度的缓解,但大部分区域仍然处于中度侵蚀的水平。而该地区属于对  $C$  因子强度敏感且地势陡峭的地区,因此应当制定相应政策减少坡耕地,增加植被覆盖的程度,能够更高效的减少当地的土壤侵蚀。IV 区虽一直处于轻中度侵蚀的水平,但研究期间侵蚀模数出现了明显的增加,仅此更应该尽早的制定农田免耕,梯田等水土保持措施来缓解降雨的影响。

### 3 结论

(1) 整体上,东北黑土区平均土壤侵蚀量有所下降,其原因主要为  $C$  因子和  $R$  因子的变动,其表现是部分地区降雨量的增减、植被覆盖的变化。

(2) 2000—2018 年  $C$  因子呈持续降低的趋势;该因子呈现 VI 和 V 区偏高,I,II,III 和 IV 偏小的分布特征。在该因子影响下,侵蚀模数从  $1\ 551.07\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  降低至  $665.39\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。研究区 I 和 V 的敏感系数分别为 0.95 和 1.00,是强度敏感的地区;II,III,IV 和 VI 区敏感系数最低,属于不敏感地区。

(3) 研究期间  $R$  因子呈现先增加后降低再增加的趋势,空间上呈现:区域 I > II > VI > III > V > IV

特征。仅在  $R$  因子影响下,侵蚀模数呈先增加后降低再增加的趋势,V 与 IV 区敏感系数分别为 1.00 和 0.45,分别属于强度敏感和轻度敏感地区;I,II,III 和 VI 区的敏感系数均较低,属于不敏感地区。

(4) 多年来,东北黑土区土壤侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主,两类侵蚀面积占比在 92.3%~96.2% 之间波动。强度侵蚀以上的地区基本分布在 I 和 V 区,侵蚀强度从西南到东北逐渐递减。研究期侵蚀模数从  $1\ 175.20\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  变化到  $822.07\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,且 2015 年还出现过  $628.73\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的最低值。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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.
- [2] 雷廷武,李法虎.水土保持学[M].北京:中国农业大学出版社,2012.
- [3] Pruski F, Nearing M A. Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: A computer simulation study [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57 (1):7-16.
- [4] Simonneaux V, Cheggour A, Deschamps C, et al. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco) [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 122:64-75.
- [5] 郑粉莉,杨勤科,唐克丽.神木试区土壤侵蚀的人为影响及流域治理现状评价[J].水土保持研究,1993,18(2):75-83.
- [6] Teng Hongfen, Liang Zongzheng, Chen Songchao, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 673-686.
- [7] Chakraborty R, Pradhan B, Mondal P, et al. The use of RUSLE and GCMs to predict potential soil erosion associated with climate change in a monsoon-dominated

- region of Eastern India [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(20): 1-20.
- [8] 吴昌广. 气候变化背景下三峡库区植被覆盖动态及其土壤侵蚀风险研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [9] 余新晓, 张学霞, 李建宇, 等. 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(1): 1-8.
- [10] 刘兴土, 马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 崔明, 张旭东, 蔡强国, 等. 东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J]. *地理研究*, 2008, 27(3): 527-535.
- [12] 刘光盛, 王红梅, 胡月明, 等. 基于不同调查时点数据的黑龙江省土地利用变化及政策驱动分析[J]. *农业现代化研究*, 2015, 1(5): 869-875.
- [13] Zhang Y G, Nearing M A, Zhang X C, et al. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multisenario projections in Northeast China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(1/2): 97-106.
- [14] 杨维鹤, 张红侠. 典型黑土区小流域土壤侵蚀的地貌分布特征[J]. *江西农业学报*, 2017, 1(12): 32-37.
- [15] 王文娟, 张树文, 李颖, 等. 近 50 年三江平原土地利用/覆被变化及土壤侵蚀分析[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2008, 25(4): 493-502.
- [16] 张雪花, 侯文志, 王宁. 东北黑土区土壤侵蚀模型中植被因子 C 值的研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 25(3): 797-801.
- [17] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- [18] 李巍, 范文义, 毛学刚, 等. 降雨量空间插值方法比较研究[D]. *安徽农业科学*, 2014(12): 67-69.
- [19] 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.
- [20] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator ( I ); Model documentation ( II ): User manual [J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 4(4): 206-207.
- [21] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [22] Liu Baoyuan, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [23] Liu Baoyuan, 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.
- [24] 路中, 雷国平, 王居午, 等. 30 年来东北典型黑土区水土流失敏感性时空分异特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 186-195.
- [25] 卞大伟, 李洪伟, 燕红, 等. 基于 RUSLE 模型的吉林省湿地土壤保持服务功能研究[J]. *吉林林业科技*, 2020, 49(6): 19-24.
- [26] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [27] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(4): 1-9.
- [28] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 340-344.
- [29] Fang Haiyan, Fan Zemeng. Assessment of soil erosion at multiple spatial scales following land use changes in 1980—2017 in the black soil region, (NE) China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(20): 73-78.
- [30] 夏既胜, 葛然. 基于灰色关联法和德尔菲法的土壤侵蚀敏感性评价: 以云南金沙江流域 3 个典型露天矿区为例[J]. *云南地理环境研究*, 2014, 4(5): 40-46.
- [31] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等.  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1376-1382.
- [32] 李国强, 方海燕. 基于  $^{137}\text{Cs}$  示踪和 WaTEM/SEDEM 模型的黑土区小流域侵蚀产沙模拟[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 86-92.
- [33] 张克新, 潘少明, 徐仪红, 等. 利用  $^{137}\text{Cs}$  大气沉降通量估算土壤侵蚀速率的可行性研究: 以辽东湾地区为例[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 269-274.
- [34] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 1-8.
- [35] 盛美玲, 方海燕, 郭敏. 东北黑土区小流域侵蚀产沙 WaTEM/SEDEM 模型模拟[J]. *资源科学*, 2015, 37(4): 815-822.
- [36] 顾治家, 谢云, 李鹭, 等. 利用 CSLE 模型的东北漫川漫岗区土壤侵蚀评价[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 49-56.
- [37] 孙禹, 哈斯额尔敦, 社会石. 基于 GIS 的东北黑土区土壤侵蚀模数计算[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 1-7.
- [38] Chang K, Tsai B. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping [J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1991, 18(1): 69-77.
- [39] 李旭亮, 杨礼箫, 田伟, 等. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3487-3495.
- [40] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数 (NDVI) 变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [41] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study [J]. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(8): 793-800.
- [42] 曲学斌, 张黎明, 孙卓. 大兴安岭植被 NDVI 变化及其对气候的响应[J]. *气象与环境学报*, 2019, 1(2): 77-83.