

# 降雨和植被因子对延河流域土壤侵蚀影响的定量评估

刘悦<sup>1</sup>, 刚成诚<sup>2,3</sup>, 温仲明<sup>1,2,3</sup>, 陈同德<sup>2,3</sup>

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 进一步明确降雨和植被因子在土壤侵蚀过程中的作用, 为水土保持措施的制定和生态工程的成效评价提供科学依据。[方法] 基于气候数据、Landsat 遥感影像和 DEM 数据, 通过设置“自然状态”、“降雨因子(降雨侵蚀力  $R$ ) 固定—植被因子(植被覆盖管理因子  $C$ ) 变化”和“ $C$  固定— $R$  变化”3 种情景, 利用修正通用土壤侵蚀方程(RUSLE)分析 2000—2018 年延河流域土壤侵蚀强度时空动态, 并定量评估降雨和植被因子对土壤侵蚀的相对贡献。[结果] ①在自然状态和  $R$  固定— $C$  变化的情况下, 2000—2018 年延河流域土壤侵蚀模数均呈现下降的趋势, 而在  $C$  固定— $R$  变化的情况下, 土壤侵蚀模数呈现上升的趋势; ②2000—2018 年, 在自然状态和  $R$  固定— $C$  变化的情景中, 延河流域强烈、极强烈和剧烈土壤侵蚀的面积均呈现下降的趋势, 主要分布在延河的中、下游地区; ③在 2000—2018 年, 植被因子有效地抑制了土壤侵蚀强度的增加, 其正向贡献率为 77.20%, 而降雨因子则对控制土壤侵蚀起负作用, 贡献率为 22.80%。[结论] 植被因子是延河流域土壤侵蚀量下降的主导和控制因子, 上游地区土壤侵蚀强度仍较高, 未来应加强水土保持措施, 合理配置植被资源。

**关键词:** 土壤侵蚀; 植被恢复; 定量评估; 结构化植被指数; 延河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0035-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 刘悦, 刚成诚, 温仲明, 等. 降雨和植被因子对延河流域土壤侵蚀影响的定量评估[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 35-42. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.005; Liu Yue, Gang Chengcheng, Wen Zhongming, et al. Quantifying relative contributions of rainfall and vegetation on soil erosion in Yanhe River watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 35-42.

## Quantifying Relative Contributions of Rainfall and Vegetation on Soil Erosion in Yanhe River Watershed

Liu Yue<sup>1</sup>, Gang Chengcheng<sup>2,3</sup>, Wen Zhongming<sup>1,2,3</sup>, Chen Tongde<sup>2,3</sup>

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The roles of rainfall and vegetation factors on controlling soil erosion were studied in order to provide guidance for policy-making of soil and water conservation strategy in the future and efficiency assessment of ecological projects. [Methods] The impacts of rainfall and vegetation on soil erosion were quantitatively evaluated with a case study in Yanhe River watershed by using the revised universal soil loss equation (RUSLE). The soil erosion was calculated under three scenarios, namely the natural state, the rainfall factor (rainfall erosivity,  $R$ ) fixed-vegetation factor (vegetation coverage and management factor,  $C$ ) change and  $C$  fixed- $R$  change. [Results] ① Under the natural state and  $R$  fixed- $C$  change scenarios, the soil erosion showed a decreasing trend in Yanhe River watershed, but an increasing trend under the  $C$  fixed- $R$  change scenario from 2000 to 2018. ② Under the natural state and  $R$  fixed- $C$  change scenario, most regions experienced decreased soil erosion from 2000 to 2018. The area with strong erosion, intensive erosion and

收稿日期: 2020-12-26

修回日期: 2021-01-18

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707); 国家自然科学基金项目“基于植被—土壤—微生物的退化草地恢复监测及驱动机制分析”(31602004); 中国科学院“西部之光”项目“黄土高原退化草地恢复监测及其驱动机理研究”(XAB2016B05)

第一作者: 刘悦(1998—), 女(汉族), 陕西省延安市人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复重建。Email: liu\_yue\_20@163.com。

通讯作者: 刚成诚(1986—), 男(满族), 辽宁省灯塔市人, 博士, 副研究员, 主要从事草地生态学与植被恢复研究。Email: gangcc@ms.iswc.ac.cn。

severe erosion all showed decreasing trend, especially in the upper and middle reaches. ③ Vegetation played a positive role in controlling the soil erosion with a contribution of 77.20% from 2000 to 2018. In contrast, the rainfall promoted the increase of soil erosion, implying a negative contribution of 22.80% in controlling the soil erosion. [Conclusion] Vegetation is the dominate factor that controls the soil erosion. However, the soil erosion is still strong in the upper reach. Therefore, soil and water conservation measures should be enhanced, and the allocation of plant resources should be rationalized in the future.

**Keywords: soil erosion; vegetation recovery; quantitatively assessment; structural vegetation index; Yanhe River watershed**

降水和植被是影响土壤侵蚀的主要因子,与土壤侵蚀的产生和变化过程密切相关<sup>[1]</sup>。降水是土壤侵蚀发生的动力来源,降雨量、降雨强度和降雨历时均是影响土壤侵蚀强度的重要因素<sup>[2-3]</sup>。植被是控制土壤侵蚀重要的环境因子,是防治土壤侵蚀的积极因素<sup>[4]</sup>。植被不仅可以截留降雨、降低雨滴动能,还具有延长地表径流形成、增加土壤入渗时间等功能。植被覆盖度越高,结构越复杂,其水土保持功能越强<sup>[4-5]</sup>。

黄土高原是中国乃至全球土壤侵蚀最为严重的地区,是黄河泥沙的主要来源区和重点治理区,生态环境脆弱<sup>[6]</sup>。自 1999 年开始,黄土高原地区先后实施了小流域治理、退耕还林(草)和坡耕地整治等一系列生态工程,生态环境得到了明显的改善,植被覆盖度增加<sup>[7-8]</sup>,多年平均入黄泥沙量从  $1.60 \times 10^9$  t 锐减至  $2.00 \times 10^8 \sim 3.00 \times 10^8$  t<sup>[9-12]</sup>。目前,关于植被恢复对黄土高原水土流失的影响已开展了大量的研究<sup>[12-15]</sup>,如 Wang 等<sup>[16]</sup> 基于泥沙恒等式的诊断方法发现 2000 年以来,植被措施是土壤保持的主要贡献者,占 57%; Sun 等<sup>[17]</sup> 基于 RUSLE 模型研究了 2000—2010 年黄土高原的土壤侵蚀,发现植被恢复对控制土壤侵蚀的作用大于降水; Gao 等<sup>[18]</sup> 基于降雨—输沙统计模型分析发现 2000 年以后土地覆被变化对黄土高原主要流域输沙减少的贡献率大于 70%; 蒋凯鑫等<sup>[13]</sup> 利用水文法等方法发现人类活动是黄河中游地区输沙量减少的主要原因。由此可见,目前大部分研究认为生态工程实施带来的植被恢复是径流和输沙量减少的主要原因,但由于研究区域、时间范围及所用方法的差异,导致降雨和植被因子对土壤侵蚀贡献的定量评估仍存在一定的不确定性<sup>[14,19-20]</sup>。为此,在退耕还林(草)工程实施 20 a 的背景下,本研究基于气候数据、Landsat 遥感影像和 DEM 数据,利用修正的土壤侵蚀方程(RUSLE)模型分别模拟自然状态、降雨因子(降雨侵蚀力  $R$ )不变和植被因子(植被覆盖管理因子  $C$ )不变 3 种情景下 2000—2018 年延河流域逐年土壤侵蚀模数,分析不同情景下土壤侵蚀强度的时空动态,定量评估降雨和植被因子对土壤侵蚀变化的相对贡献,以期对未来制

定土壤侵蚀应对策略提供理论依据,亦可为退耕还林还草等工程的生态效应评估提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

延河是黄河的一级支流,发源于靖边县境内,由西北向东南流经志丹县、安塞县和延安,在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河,全长 286.9 km<sup>[21]</sup>。主要支流包括杏子河,西川、潘龙川和南川等,整个流域面积为 7 725 km<sup>2</sup>,位于陕北黄土高原中部丘陵沟壑区(36°21'—37°19'N,108°38'—110°29'E),地势西北高、东南低,地形破碎复杂,沟壑密度在 2.1~4.6 km/km<sup>2</sup> 之间,黄绵土占流域总面积的 85% 以上,土质疏松,抗侵蚀能力差<sup>[21-22]</sup>(见封 3,附图 1)。该流域属于温带大陆性半干旱半湿润气候区,年均温约为 9 °C,年降水量约为 500 mm,大部分地区干旱少雨,降雨季节分配不均,夏季多暴雨,降水变化率大。植被以次生植被和中、低覆盖度草地为主,天然林集中部分在流域的西南部(见封 3,附图 1)。常见的植物种从南向北有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)。延安至安塞之间为柠条(*Caragana korshinskii*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*),安塞以北为百里香(*Thymus vulgaris*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等<sup>[22-23]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究所用的数据包括:① DEM 数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为 30 m;② 气象数据:流域内及周边气象站数据来源于中国气候数据共享网;③ 土地利用数据:来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为 30 m;④ 遥感影像数据:2000—2018 年延河流域 6—9 月的 Landsat 7ETM 和 Landsat 8OLI 遥感影像(127034,127035,126035),来源于美国 USGS 网站,利用 ENVI 软件进行缺失条带插补、辐射定标和大气校正等操作,提取植被结构指数应用于 RUSLE 模型中。

### 1.3 土壤侵蚀模型

本研究采用 RUSLE 来计算延河流域的土壤侵蚀模数:

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

式中: $A$  为年均土壤侵蚀模数,是指单位面积单位时间和空间的平均土壤流失量 [ $t/(km^2 \cdot a)$ ];  $R$  为降雨侵蚀力因子 [ $MJ \cdot mm/(km^2 \cdot h \cdot a)$ ];  $K$  为土壤可蚀性因子 [ $t \cdot hm^2 \cdot h/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ];  $L, S$  分别为坡长和坡度因子;  $C$  为植被覆盖管理因子;  $P$  为水土保持措施因子。

1.3.1 降雨侵蚀力因子( $R$ ) 降雨侵蚀力反映了降雨对土壤侵蚀的剥离和搬运能力,与降雨量、降雨强度和降雨历时等因素有关<sup>[21]</sup>。本研究利用逐月雨量计算 2000—2018 年延河流域的降雨侵蚀力<sup>[24]</sup>。利用气象站点降雨量数据通过 AUSPLINE 插值求得降雨量的空间分布图,空间分辨率为 30 m。

1.3.2 土壤可蚀性因子( $K$ ) 土壤可蚀性因子是反映降雨过程中土壤性质对土壤流失的影响,其定义为标准小区单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率<sup>[25]</sup>。本研究利用 EPIC 模型计算延河流域的  $K$  值<sup>[26]</sup>。

1.3.3 坡度和坡长因子( $LS$ ) 坡度和坡长影响着土壤和植被的形成与发展,决定了地表径流的运动状态和方向。坡度越大,坡长越长,径流能量越大,土壤侵蚀作用越强。本文采用刘宝元等在黄土高原改进的、基于 DEM 的方法计算延河流域的坡度坡长因子<sup>[27]</sup>。

1.3.4 植被覆盖管理因子( $C$ ) 结构化植被指数( $C_s$ )不仅考虑了植物群落的水平结构特征,还考虑了不同群落垂直结构特征在水土保持作用中的差异<sup>[28-29]</sup>。因此,本研究采用植被结构指数  $C_s$  代替传统 NDVI 作为植被覆盖管理因子  $C$  的计算,其计算公式为:

$$C = \exp\left[-\alpha \times \frac{C_s}{(\beta - C_s)}\right] \quad (2)$$

式中: $\alpha, \beta$  的取值分别为 2, 1<sup>[21]</sup>。由于水体和建筑用地的  $C_s$  较低,接近于 0,但它们的土壤侵蚀强度很小,因此将水体和城镇用地的  $C$  值赋值为 0。

$C_s$  的计算公式为:

$$NDVI = \frac{SWIR2 - SWIR1}{SWIR2 + SWIR1} \quad (3)$$

$$MSAVI = 0.5 + NIR - 0.5 \times$$

$$\sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - R)} \quad (4)$$

$$C_s = 0.175MSAVI + 0.522NDTI \quad (5)$$

式中:NDTI 为归一化耕作指数,无量纲;  $R, NIR, SWIR1$  和  $SWIR2$  分别为 Landsat 7, 8 影像的短波红外波段 1 和 2; MSAVI 为修正的土壤调整植被指数。

1.3.5 水土保持措施因子  $P$  采用给不同土地利用类型赋值的方法确定  $P$  值<sup>[30]</sup>。依据表 1 按照坡度范围对耕地进行赋值。水体、建筑用地、林地和草地一般未采取水土保持措施,因此赋值为 1。

表 1 不同坡度范围耕地的  $P$  值

坡度范围	5°	5°~10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	>25°
$P$ 值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

### 1.4 降雨和植被因子对土壤侵蚀影响的定量评估

设置自然状态、 $C$  固定- $R$  变化和  $R$  固定- $C$  变化 3 种情景,分别计算不同情景下 2000—2018 年延河流域逐年土壤侵蚀模数,进而揭示降雨和植被因子对土壤侵蚀变化的相对贡献,计算公式为:

$$\text{自然状态情景: } A_i = R_i \cdot K \cdot LS \cdot C_i \cdot P \quad (6)$$

$C$  固定- $R$  变化情景:

$$A-R_i = R_i \cdot K \cdot LS \cdot C_{2000} \cdot P \quad (7)$$

$R$  固定- $C$  变化情景:

$$A-C_i = R_{2000} \cdot K \cdot LS \cdot C_i \cdot P \quad (8)$$

式中: $A_i$  为自然状态下第  $i$  年土壤侵蚀模数;  $R_i$  为第  $i$  年降雨侵蚀力因子;  $C_i$  为第  $i$  年植被覆盖管理因子;  $A-R_i$  为  $C$  固定- $R$  变化情景下第  $i$  年的土壤侵蚀模数;  $C_{2000}$  为 2000 年植被覆盖管理因子;  $A-C_i$  为  $R$  固定- $C$  变化情景下第  $i$  年的土壤侵蚀模数;  $R_{2000}$  为 2000 年的降雨侵蚀力。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种情景下延河流域土壤侵蚀的时间动态

2000—2018 年,自然状态、 $R$  固定- $C$  变化和  $C$  固定- $R$  变化的情景下延河流域土壤侵蚀的时间动态如图 1 所示。在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化的情景中,土壤侵蚀模数均呈现下降的趋势,在 19 a 间分别下降了 44.15% 和 56.86%。2001 年土壤侵蚀模数最高,分别达到 15 867.67 和 15 392.71  $t/(km \cdot a)$ ,之后逐渐下降,而在 2014 年后,又呈现逐渐上升趋势。在  $C$  固定- $R$  变化的情景中,土壤侵蚀模数呈现微弱的上升趋势,19 a 间共上升了 11.86%。为进一步了解不同情景中土壤侵蚀的时间动态,本文研究了不同侵蚀等级的时间变化特征(图 2)。在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化的情景中,微度和轻度侵蚀的面积均有所增加,同时,强烈、极强烈和剧烈侵蚀的面积均有所

下降。在自然状态下,微度和轻度侵蚀的总面积占流域总面积的比例从 2000 年的 27.36% 增加到 2018 年的 49.67%。同时,强烈、极强烈和剧烈侵蚀的面积所占比例从 59.60% 下降到 36.84%;在  $R$  固定- $C$  变化的情景中,微度和轻度侵蚀的面积之和所占比例则增加到 2018 年的 57.11%,强烈、极强烈和剧烈侵蚀的面积之和所占比例下降到 29.74%。而在  $C$  固定- $R$  变化的情景中,各土壤侵蚀强度面积的所占比例变化不大,2018 年微度和轻度侵蚀的面积之和所占比例为 22.98%,强烈、极强烈和剧烈侵蚀的面积之和所占比例为 64.32%。

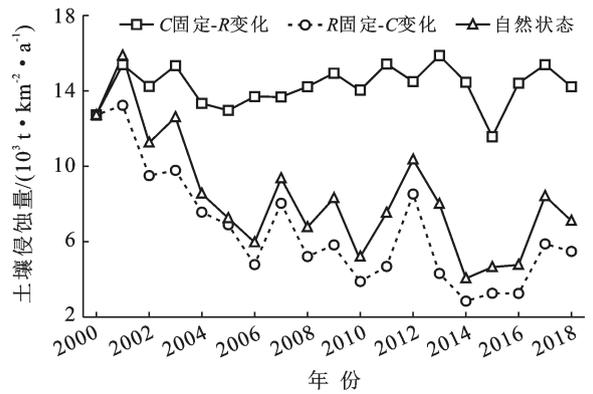


图 1 延河流域在 3 种情景下土壤侵蚀的时间动态

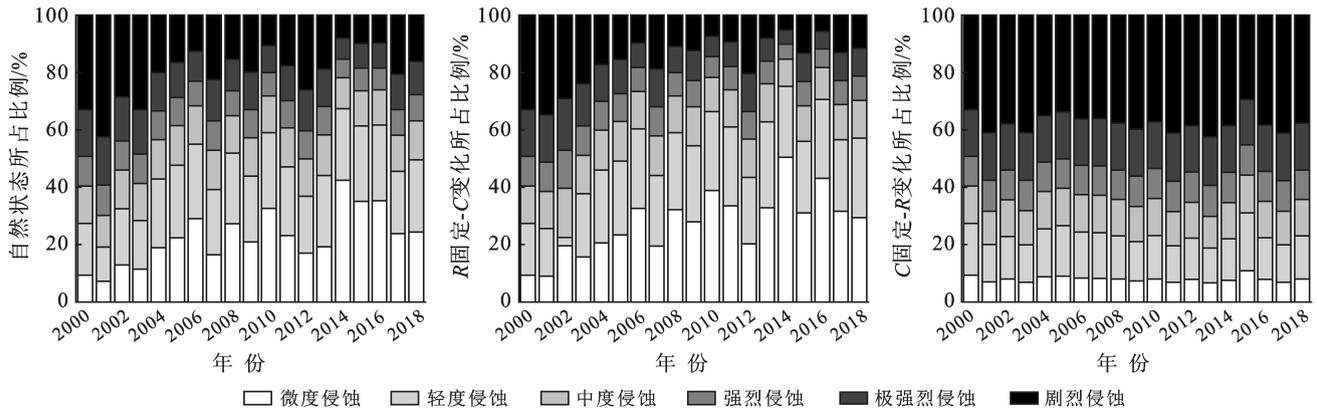


图 2 2000—2018 年延河流域在 3 种情景下不同侵蚀强度面积的比例变化

## 2.2 3 种情景中延河流域土壤侵蚀的空间动态

3 种情景中,2001 年土壤侵蚀模数大于  $5\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的区域广泛分布于延河的上、中和下游,轻度和微度侵蚀的区域主要分布在延河沿岸地带及流域的西南部(图 3);在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化的情景中,2009 年轻度和微度侵蚀的面积均有所增加,且在  $R$  固定- $C$  变化的情景中,增加更为明显,其主要分布在延河的中游和下游地区。相比之下, $C$  固定- $R$  变化的情景中,土壤侵蚀模数的空间分布并未有明显变化。2018 年,在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化的情景中,轻度和微度侵蚀的面积略微增加,此时土壤侵蚀模数大于  $5\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的区域主要集中在延河的上游。而  $C$  固定- $R$  变化的情景中,土壤侵蚀模数的空间分布与 2009 年较为类似。2000—2009 年,自然状态下土壤侵蚀强度呈现下降趋势的面积占流域总面积的 53.70%(图 4)。在  $R$  固定- $C$  变化的情景中,土壤侵蚀强度下降区域的面积占流域总面积达 71.09%,而在  $C$  固定- $R$  变化的情景中,土壤侵蚀强度未有下降趋势,其中呈现不变和增加趋势的面积分别占流域总面积的 53.20% 和 46.80%。在 2009—2018 年,自然状态下土壤侵蚀强度呈现上升和下降

趋势的面积分别占流域总面积的 15.75% 和 32.39%;在  $R$  固定- $C$  变化的情景中,土壤侵蚀强度上升和下降区域的面积所占比例分别为 19.63% 和 24.71%;而  $C$  固定- $R$  变化的情景中,土壤侵蚀强度不变的面积达 84.10%,其余为土壤侵蚀强度降低一级的区域,面积所占比例为 15.90%。从整个研究时期来看,自然状态和在  $R$  固定- $C$  变化的情景中,土壤侵蚀强度主要以下降为主,而在  $C$  固定- $R$  变化的情况下,土壤侵蚀强度则以不变和上升为主(图 4)。

## 2.3 降雨和植被因子对土壤侵蚀变化贡献率的定量评估

在自然状态、 $R$  固定- $C$  变化和  $C$  固定- $R$  变化情景下,基于 2000—2009 年、2009—2018 年和 2000—2018 年不同土壤侵蚀强度变化分析了降雨和植被因子对土壤侵蚀作用的大小。由图 5 可知,3 个时间段内植被因子的贡献表现为促进了微度、轻度和中度侵蚀强度的增加,其在 2009—2018 年平均贡献率为 67.70%,在 2000—2009 年和 2000—2018 年的平均贡献率均在 70% 以上;在 3 个时期内,植被因子对强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度的增加表现为抑制作用,即促进了强度的降低,其贡献率约为 80%。

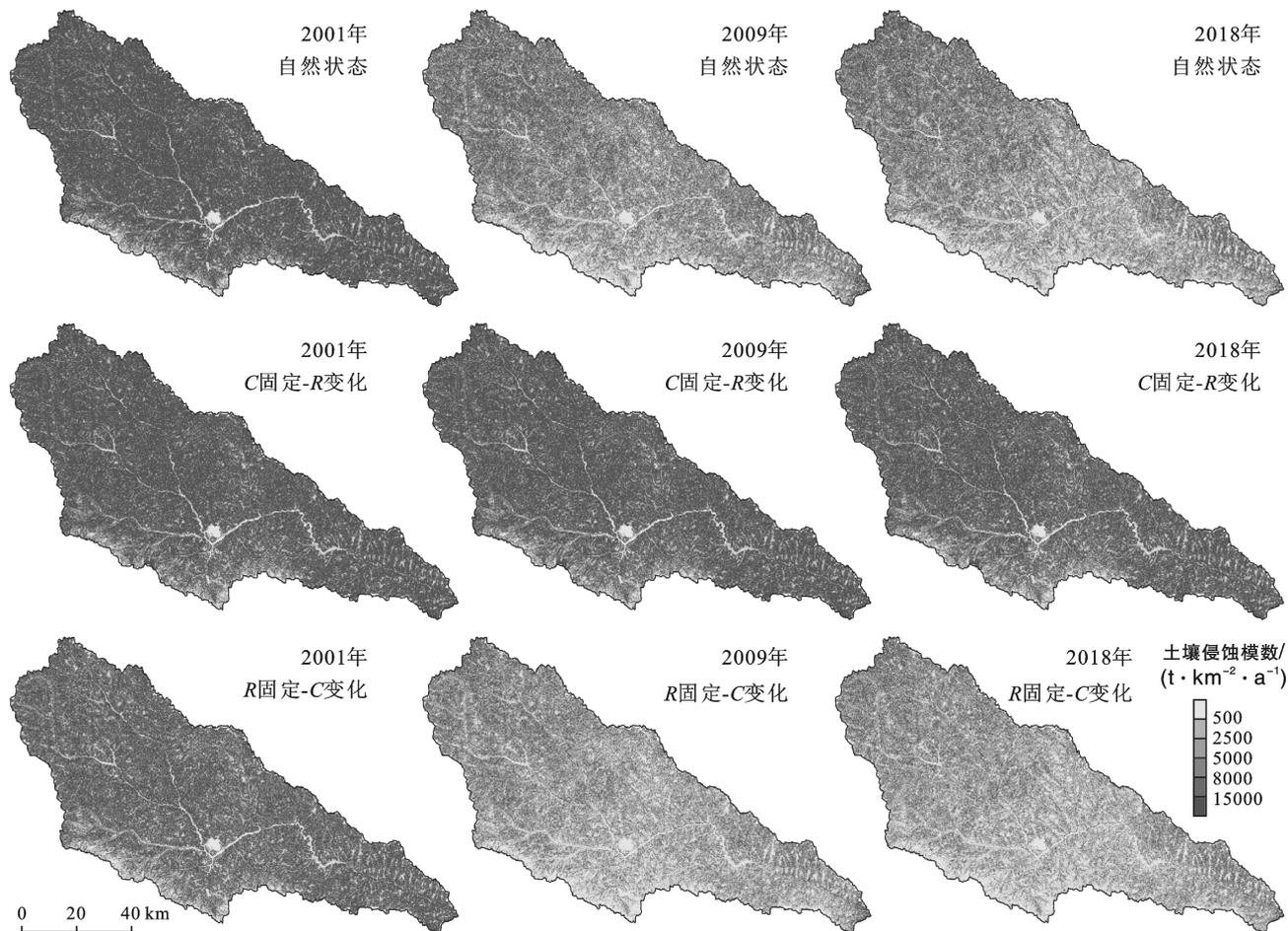


图 3 2001,2009,2018 年延河流域在 3 种情景下的土壤侵蚀模数空间分布

相比之下,降雨促进了土壤侵蚀强度的增加。在 2000—2009 年,降雨促进了极强烈和剧烈侵蚀强度的增加,贡献率分别为 22.23% 和 23.12%;同时,降雨抑制了其他侵蚀强度的增加,其中对中度侵蚀的贡献率达到 54.69%;在 2009—2018 年,降雨促进了中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度的增加,其贡献率在 18.40%~53.18% 之间。在整个研究时间段内,降雨因子的作用表现为促进强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度的增加。

### 3 讨论

降雨是引起土壤侵蚀产生的最主要动力因素之一。延河流域侵蚀性降雨多集中在夏季雨季,暴雨频发,土壤侵蚀较为严重。本研究发现,2000—2018 年,R 固定-C 变化的情景中土壤侵蚀模数低于自然状态下土壤侵蚀模数,二者的时间和空间动态较为接近,表明这 19 a 间,降雨量的变化增加了延河流域土壤侵蚀的土壤侵蚀。进一步分析发现,在 2000—2018 年,降雨促进了强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积的增加,其贡献率约为 20%。在我国喀斯特地区的研

究同样证明了降雨的增加会造成土壤侵蚀强度的增加,其贡献率在 7.5%~26.0%<sup>[31]</sup>。在同等降雨条件下,是否发生土壤侵蚀与植被特征有着密切的关系。植被覆盖度越高,结构越完整,对雨滴的截留作用越大,越能够分散和削弱雨滴的能量,有效防止雨滴对地面直接打击和破坏作用,产生的土壤侵蚀越小<sup>[28]</sup>。因此,植被状况是影响土壤侵蚀变化的关键因素。本研究结果表明,在 C 固定-R 变化的情景中,土壤侵蚀模数的变化趋势与自然状态差别较大,表明植被因子对控制土壤侵蚀的作用更强。在 2000—2018 年,延河流域的平均结构化植被指数显著增加( $p < 0.001$ ) (图 6)。自退耕还林还草等一系列生态恢复工程实施以来,延河流域植被状况明显改善,流域内产流产沙量明显下降<sup>[5,8]</sup>。本研究发现,2000—2018 年,植被因子有效抑制了强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度的增加,其正向贡献率达 77.20%。徐学选等<sup>[32]</sup>的研究发现降水和人类活动对 1956—2009 年延河流域的输沙量减少的贡献分别为 30% 和 70%;赵跃中等<sup>[5]</sup>的研究表明,1996—2010 年,植被恢复为主导的水土保

持措施对延河流域输沙量减少的贡献率为 55.9%；王志杰等<sup>[31]</sup>在贵阳喀斯特地区的研究证实植被覆盖因子对土壤侵蚀变化贡献了 74%~92%，是土壤侵蚀变化的主导和控制因子；Zhao 等<sup>[33]</sup>在黄土高原皇甫川流域研究发现人类活动对输沙量减少的贡献率高达 93.6%。但王涛等<sup>[20,34]</sup>在陕北洛河流域的研究

表明，在 2000—2014 年，降雨对土壤侵蚀的贡献大于植被。原因可能在于洛河流域面积较大，降水的作用更为突出，但其结果也证实退耕还林还草工程的实施有效降低了土壤侵蚀量。钟丽娜等<sup>[35]</sup>的研究亦表明土地利用与覆被对土壤侵蚀的作用有明显的尺度效应。

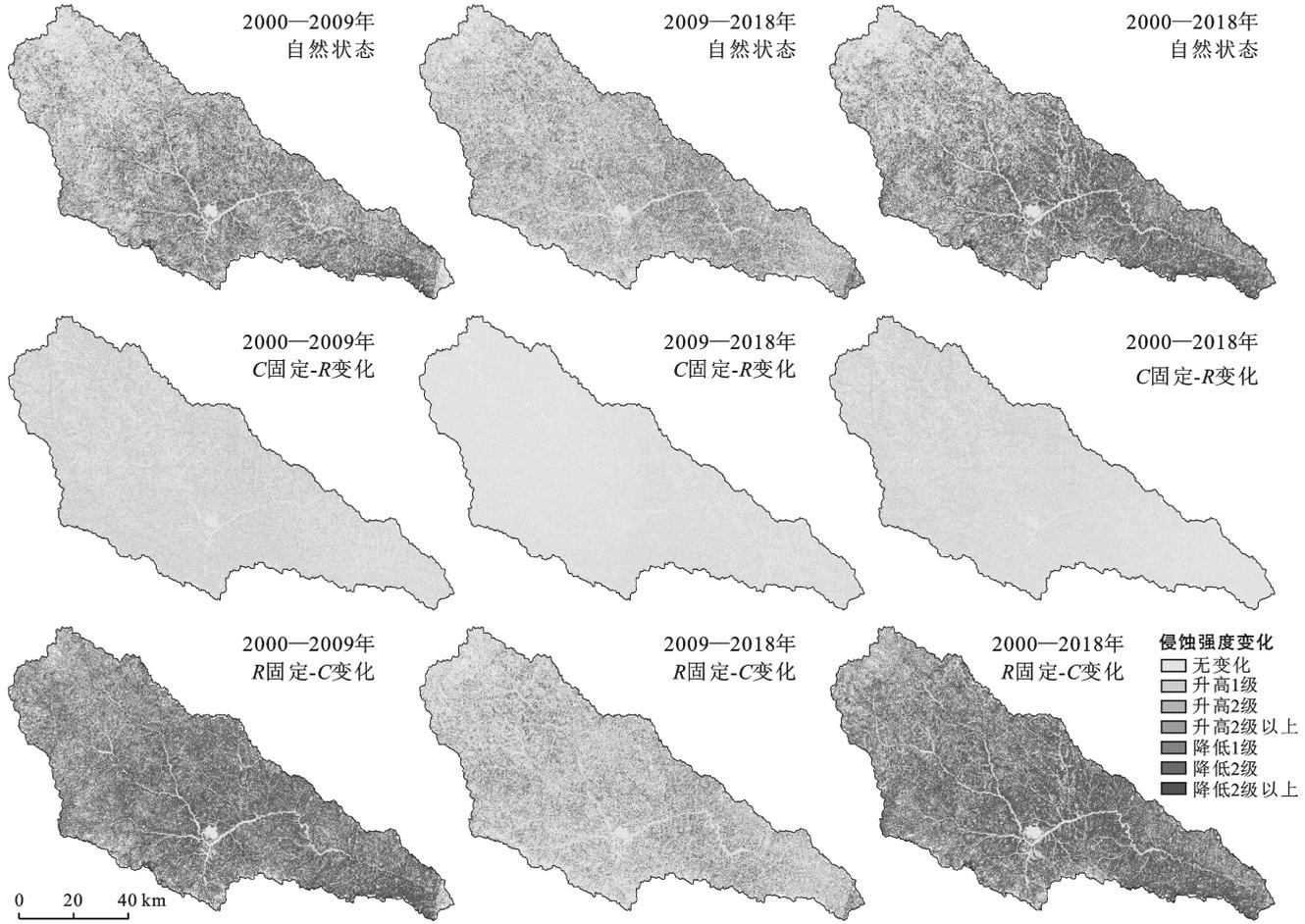
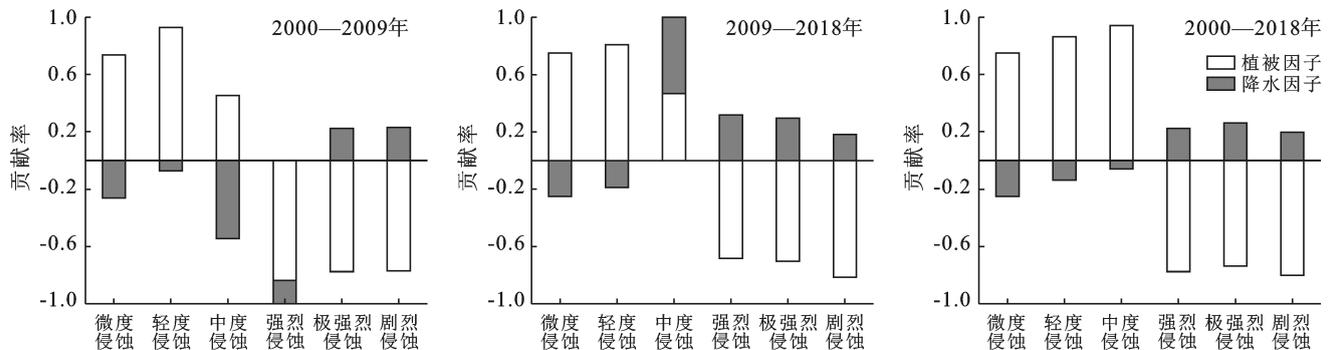


图 4 2000—2009 年、2009—2018 年和 2000—2018 年延河流域 3 种情景下土壤侵蚀强度空间变化



注：贡献率大于 0 表现为促进作用，小于 0 表现为抑制作用。

图 5 延河流域各阶段降雨和植被因子对土壤侵蚀强度的相对贡献

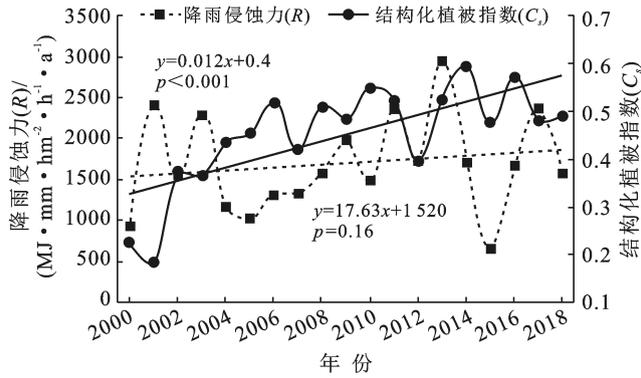


图 6 2000—2018 年延河流域降雨侵蚀力( $R$ )和植被结构指数( $C$ )的动态变化

## 4 结论

(1) 2000—2018 年,在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化情景中,土壤侵蚀模数均呈现下降的趋势,在 19 a 间分别下降了 44.15% 和 56.86%;在  $C$  固定- $R$  变化的情景中,不同土壤侵蚀强度的面积变化不大,19 a 间土壤侵蚀模数上升了 11.86%;

(2) 2000—2018 年,在自然状态和  $R$  固定- $C$  变化情景中,土壤侵蚀强度下降的地区主要分布在延河的中游和下游,其中 2000—2009 年土壤侵蚀强度下降的程度大于 2009—2018 年;在  $C$  固定- $R$  变化的情景中,延河流域土壤侵蚀强度在 2000—2009 年以不变和上升为主,而在 2009—2018 年以不变和下降一级为主。

(3) 2000—2018 年,植被因子是控制延河流域土壤侵蚀强度的主导因素,其贡献率为 77.20%,而降雨因子对控制土壤侵蚀起负作用,即促进了土壤侵蚀强度的增加。在全球气候变暖的背景下,未来极端降雨事件发生的频次将增加,如何在延河流域,尤其是上游地区,优化配置水土保持措施,增强植被的正向效应,同时降低降雨的负向效应是需进一步思考的问题。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.

[2] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.

[3] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[4] 秦伟,曹文洪,左长清,等.植被与地形对侵蚀产沙耦合影响研究评述[J].泥沙研究,2015(3):74-80.

[5] 赵跃中,穆兴民,严宝文,等.延河流域植被恢复对径流泥

沙的影响[J].泥沙研究,2014(4):67-73.

[6] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China [J]. Annual Review of Earth & Planetary Ences, 2016,45(1):223-243.

[7] 李锐.黄土高原水土保持工作 70 年回顾与启示[J].水土保持通报,2019,39(6):298-301.

[8] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.

[9] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017,33(13):159-167.

[10] 姚文艺,高亚军,张晓华.黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J].中国水土保持科学,2020,18(4):1-11.

[11] 刘晓燕,党素珍,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J].水利学报,2020,51(5):505-518.

[12] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄土高原流域水沙变化研究进展[J].生态学报,2020,40(1):2-9.

[13] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.

[14] Zhao Guangju, Tian Peng, Mu Xingmin, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:387-398.

[15] Zhang Jianjun, Gao Guangyao, Fu Bojie, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. Water Resources Research, 2019,55(11):9604-9622.

[16] Shuai Wang, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016,9(1):38-41.

[17] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyan. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,23(6):1091-1106.

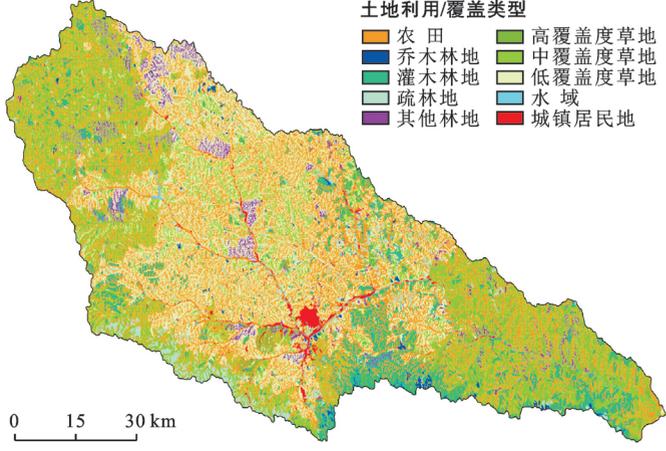
[18] Gao Guangyao, Zhang Jianjun, Liu Yu, et al. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017,21(9):4363-4378.

[19] 王涛,徐澜,胡阳,等.陕北无定河流域土壤侵蚀与植被覆盖和降雨关系研究[J].水利水电技术,2017,48(6):149-155.

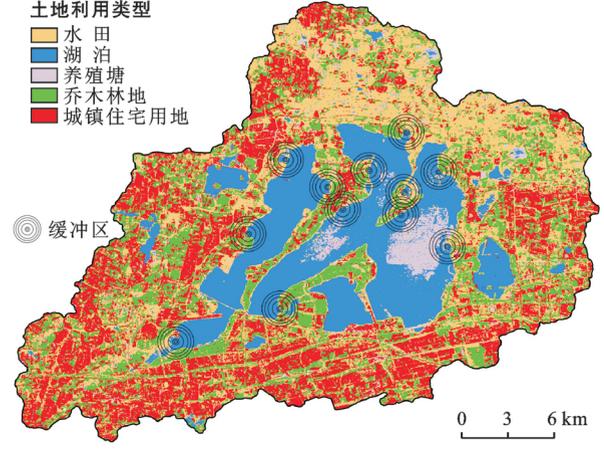
- [20] 王涛. 基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估: 以陕北洛河流域为例[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(8): 170-177.
- [21] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [22] 顾朝军, 穆兴民, 孙文义, 等. 极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1755-1767.
- [23] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.
- [24] Yu B, Rosewell C J. A robust estimator of the R-factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 559-561.
- [25] 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.
- [26] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator ( I ): model documentation [J]. Technical Bulletin-Usda, 1990, 4(4): 206-207.
- [27] Liu B Y, 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.
- [28] 雷婉宁, 温仲明. 基于植物群落结构的水土流失植被因子指数研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 68-72, 77.
- [29] 雷婉宁, 温仲明. 基于 TM 遥感影像的陕北黄土区结构化植被因子指数提取[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2736-2742.
- [30] 水利部水土保持监测中心. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水土保持监测中心, 2006.
- [31] 王志杰, 柳书俊, 苏嫄. 喀斯特高原山地贵阳市 2008—2018 年土壤侵蚀时空特征与侵蚀热点变化分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 94-102.
- [32] 徐学选, 高朝侠, 赵娇娜. 1956—2009 年延河水沙变化特征及其驱动力研究[J]. 泥沙研究, 2012(2): 12-18.
- [33] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Jiao Juying, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 773-784.
- [34] 王涛. 陕北洛河流域降水和植被变化对土壤侵蚀的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 295-300.
- [35] 钟莉娜, 王军, 赵文武, 等. 多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 432-443.

(上接第 34 页)

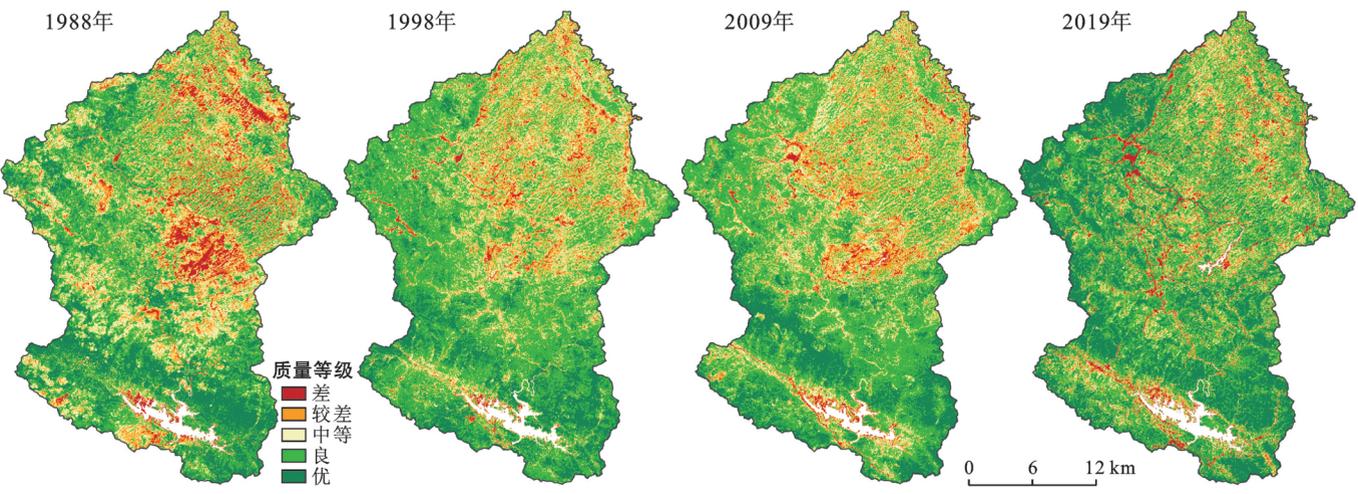
- [12] Novotný J, Klimeš J. Grain size distribution of soils within the Cordillera Blanca, Peru: An indicator of basic mechanical properties for slope stability evaluation [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 563-577.
- [13] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 395-404.
- [14] 铁永波. 冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集过程与灾变初探[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 12-16.
- [15] 吕士展, 汪稔, 胡明鉴, 等. 冰碛土工程特性研究的现状、问题及展望[C]//中国地质学会. 2011 年全国工程地质学术年会论文集. 2011.
- [16] 党超, 褚娜娜, 丁瑜. 冰湖溃决泥石流形成的临界条件[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1176-1183.
- [17] 游勇, 程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J]. 山地学报, 2005, 23(3): 288-293.
- [18] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 621-628.
- [19] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Chen Ningsheng, et al. Calculation of discharge of debris flows caused by mo-  
rain-dam failure at Midui gully, Tibet, China [J]. Iranian Journal of Science & Technology Transaction B(Engineering), 2007, 31(B2): 195-207.
- [20] Chen Huanyong, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Experimental investigation of pressure load exerted on a downstream dam by dam-break flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 199-207.
- [21] Chen Huayong, Cui Peng, Chen Xiaoqing, et al. Study on the surge wave induced by glacier avalanches and its effects on dam failure process [J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2017, 10(1): 9-15.
- [22] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏终碛湖溃决形式研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 372-380.
- [23] 黄金辉, 刘建康, 程尊兰, 等. 涌浪规模对冰碛湖溃决的影响实验[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 241-248.
- [24] Hanson G J, Robinson K M, Cook K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(4): 525-531.
- [25] 孟震, 杨文俊. 泥沙颗粒水下休止角与内摩擦角差异化初步探索[J]. 泥沙研究, 2012(4): 76-80.



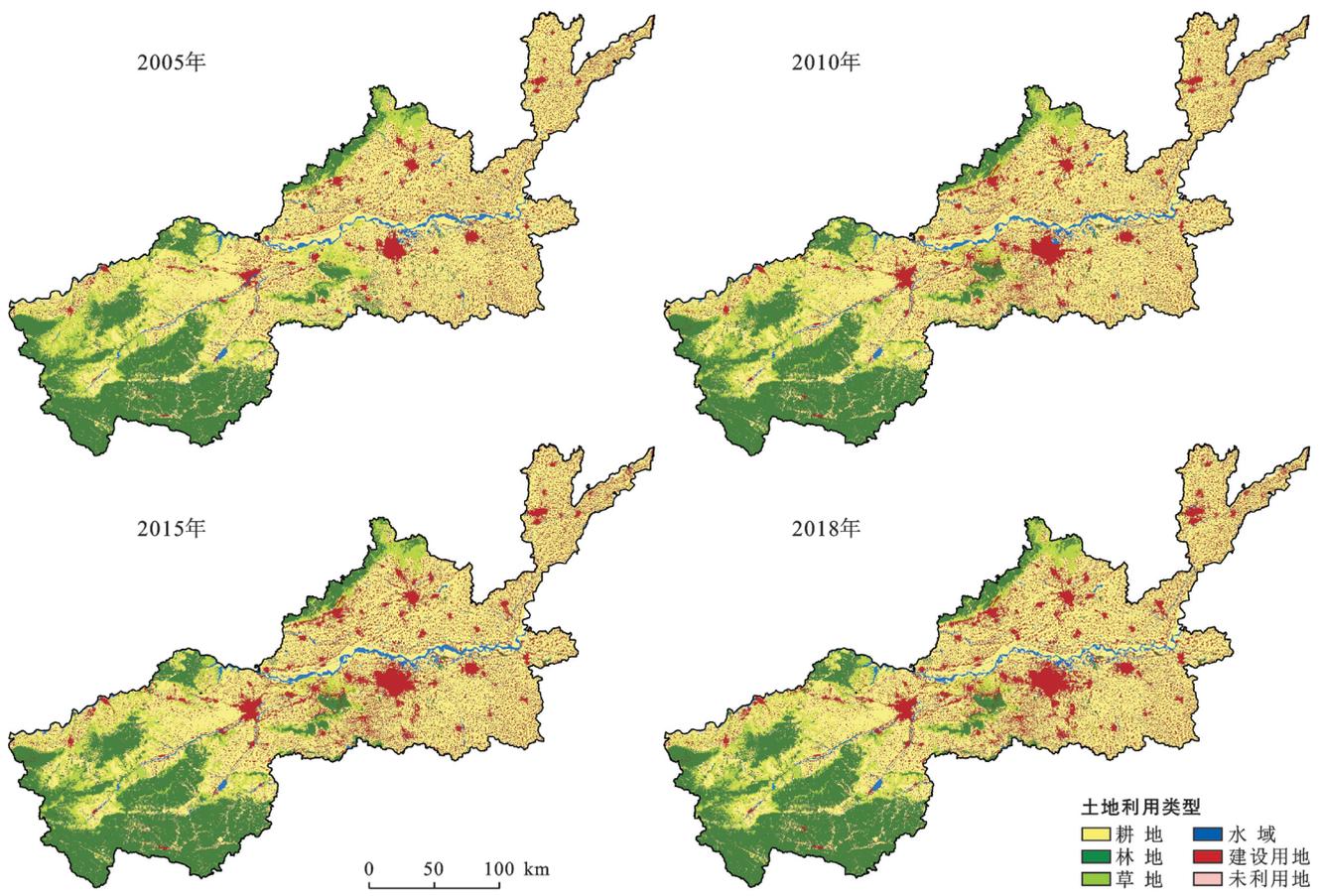
附图1 延河流域2015年土地利用与覆盖状况(第36页)



附图2 阳澄湖小流域2019年土地利用和缓冲区域分布(第107页)



附图3 澄碧河流域1988—2019年生态环境质量的空间分布(第235页)



附图4 河南省2005—2018年土地利用类型(第252页)