

# 2007—2020年白沙河流域土壤水力侵蚀时空变化

谢航宇<sup>1,2</sup>, 江怡<sup>3</sup>, 陈麒<sup>3</sup>, 鲍玉海<sup>1</sup>, 胡云华<sup>4</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 2.中国科学院大学, 北京100049; 3.成都市水务技术中心, 四川成都610041; 4.自然资源部第六地形测量队, 四川成都610500)

**摘要:** [目的] 研究四川省都江堰市白沙河流域地震前后土壤水力侵蚀时空变化规律, 为地震灾区水源保护和土壤侵蚀防治工作提供科学参考。[方法] 利用中国土壤流失方程 CSLE(chinese soil loss equation)定量分析了 2007—2020 年白沙河流域土壤水力侵蚀面积、强度、空间分布特征。[结果] ①地震后流域水力侵蚀强度等级整体呈现先升高再降低的趋势, 2007, 2008, 2013, 2018, 2020 年土壤侵蚀模数分别为 817.51, 3 000.11, 5 828.89, 1 549.76, 1 558.37 t/(km<sup>2</sup>·a), 2020 年土壤侵蚀强度下降到以轻度侵蚀为主, 平均土壤侵蚀模数相比 2008 年降低了 48.1%。②坡度 35°以上和海拔 2 000 m 以上区域贡献的土壤侵蚀量分别占 2020 年总量的 85.44%, 68.20%, 平均土壤侵蚀模数超过 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 的强烈及以上强度侵蚀主要发生在海拔 4 000 m 以上的地区。③震后 10 a 来, 虽然白沙河流域平均植被覆盖度在 60%~74% 之间, 但中度及以上强度侵蚀面积相较于地震前仍呈现较高比例, 2020 年中度及以上强度侵蚀面积比例是地震前 2007 年的 4.13 倍。[结论] 随着自然恢复年限的增加, 2013—2020 年白沙河流域土壤水力侵蚀状况得到有效改善, 但流域中上游局部地区仍存在强烈及以上强度侵蚀, 地形条件和降雨侵蚀力对其变化影响作用明显。

**关键词:** 土壤侵蚀; CSLE; 白沙河流域; 时空变化; 汶川地震; 四川省都江堰市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0074-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 谢航宇, 江怡, 陈麒, 等. 2007—2020 年白沙河流域土壤水力侵蚀时空变化[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 74-81. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.010; Xie Hangyu, Jiang Yi, Chen Qi, et al. Spatial and temporal changes in soil water erosion in Baisha River basin from 2007 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 74-81.

## Spatial and Temporal Changes in Soil Water Erosion in Baisha River Basin from 2007 to 2020

Xie Hangyu<sup>1,2</sup>, Jiang Yi<sup>3</sup>, Chen Qi<sup>3</sup>, Bao Yuhai<sup>1</sup>, Hu Yunhua<sup>4</sup>, He Xiubin<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chengdu Technology Center of Water Affairs, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Sixth Topographic Survey Team of the Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial-temporal variations of soil water erosion before and after the Wenchuan earthquake in the Baisha River basin of Dujiangyan City, Sichuan Province were assessed to support water source protection efforts and comprehensive control of soil erosion in the earthquake-stricken area. [Methods] The characteristics of soil water erosion (i. e., area, intensity, and spatial distribution) in the Baisha River basin from 2007 to 2020 were quantitatively analyzed by using the Chinese Soil Loss Equation (CSLE). [Results] ① The intensity of soil water erosion after the Wenchuan earthquake in the Baisha River basin initially increased and then decreased. The average soil erosion modulus values for the Baisha River basin

收稿日期: 2022-01-18

修回日期: 2022-03-11

资助项目: 四川省区域创新合作研究项目“川渝地区陡坡耕地禁垦坡度诊断方法与坡耕地综合治理技术研究”(2020YFQ0002); 成都市水土保持监测分站政采项目“成都市中心城区水源区白沙河流域水土流失综合防治体系研究”(5101012019001908)

第一作者: 谢航宇(1997—), 男(汉族), 四川省仪陇县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: xiehangyu0405@163.com。

通讯作者: 鲍玉海(1981—), 男(汉族), 山东省成武县人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: byh@imde.ac.cn。

were 817.51, 3 000.11, 5 828.89, 1 549.76, and 1 558.37 t/(km<sup>2</sup> · a) in 2007, 2008, 2013, 2018, and 2020, respectively. The intensity of soil erosion in 2020 was mainly classified as light erosion, and the average soil erosion modulus was 48.1% lower than in 2008. ② The average soil erosion modulus gradually increased with increasing slope gradient or altitude. Soil erosion amount contributed by regions with slope greater than 35° and elevation above 2 000 m accounted for 85.44% and 68.20%, respectively, of the total erosion amount in 2020. In addition, the extremely severe erosion area with an average soil erosion modulus of more than 5 000 t/(km<sup>2</sup> · a) mainly occurred in areas with elevation above 4 000 m. ③ Although the average vegetation coverage in the Baisha River basin in the past 10 years was between 60% and 74%, the proportion of the area classified as having moderate and more severe erosion was still greater than before the earthquake. In 2020, the proportion of moderate and more severe erosion area was 4.13 times greater than in 2007. [Conclusion] Even though the soil water erosion situation has effectively improved between 2013 and 2020, areas of intense and more severe erosion remain in the middle and upper reaches of the study area, and the topographic conditions and rainfall erosivity had an obvious impact on the change in erosion area.

**Keywords:** soil erosion; CSLE; Baisha River basin; temporal and spatial changes; Wenchuan earthquake; Dujiangyan City, Sichuan Province

土壤侵蚀直接破坏土壤资源,导致土地生产力降低、河库(湖)泥沙淤积和水质恶化,影响社会经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。据2020年中国水土保持公报显示,四川省水力侵蚀总面积达 $1.06 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,占土地总面积的21.55%,土壤侵蚀问题在全国各省份中较为突出<sup>[2]</sup>。汶川特大地震加剧了灾区土壤侵蚀的发生发展<sup>[3-4]</sup>,随着震后10 a来灾后恢复重建工作的开展,林草植被逐渐恢复,新增水土流失得到了初步治理<sup>[5]</sup>。适时定量评估灾区土壤侵蚀时空演变趋势,是进一步科学实施水土流失预防和治理等工作的重要基础。

土壤侵蚀模型已被广泛用于区域土壤侵蚀成因、过程机理及其定量评价等研究。20世纪30年代以来,国内外学者陆续提出了各具特色的土壤侵蚀物理模型或经验模型<sup>[6-7]</sup>。其中,由美国农业部开发的USLE和RUSLE模型是具有代表性的土壤水力侵蚀经验统计模型<sup>[8-10]</sup>。刘宝元等<sup>[11]</sup>在USLE基础上,针对我国土壤侵蚀特征和水土保持措施的特点,建立了用于土壤水力侵蚀定量计算的中国土壤流失方程(CSLE)。与美国的USLE和RUSLE模型相比,中国土壤流失方程中各因子的计算方法根据中国的地形地貌特点和实测径流小区资料等进行了一定的改进,更适合于在中国使用。目前已有许多学者采用CSLE模型在流域等尺度开展土壤侵蚀研究<sup>[12-15]</sup>。

白沙河流域是成都市中心城区水源地,距离汶川地震震中不足50 km,流域内山高坡陡,降雨时空分布不均、集中且雨强大,其地形地貌等特点在龙门山断裂带具有一定的典型性和代表性,研究白沙河流域

土壤侵蚀时空变化情况,可以反映四川省境内受地震影响的流域土壤侵蚀总体变化趋势。本研究基于CSLE模型定量评价了白沙河流域2007,2008年(震后),2013,2018和2020年的土壤水力侵蚀状况,探讨了2007—2020年白沙河流域土壤水力侵蚀时空变化情况,以期对白沙河流域及相似区域开展水土流失治理工作提供一定的数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白沙河流域(103°34′13″—103°43′10″E, 31°01′43″—31°22′05″N)位于都江堰市境内,距离汶川特大地震震中牛圈沟不足50 km,流域面积约360.12 km<sup>2</sup>,是成都市中心城区重要水源地之一。该区属于亚热带湿润季风气候,2007—2020年均降雨量在715.1~1 939.2 mm之间,多年平均降雨量1 125.4 mm,降雨多集中于5—9月,占全年降水量的80%以上,汛期集中强降雨易加剧土壤侵蚀<sup>[16]</sup>。流域属成都平原西北边缘山区,地势西北高,东南低,地貌类型以中高山为主。海拔在741.63~4 587.23 m之间,平均坡度39.43°。流域内植被覆盖良好,土壤、植被垂直变化明显。土地利用主要以林地为主,草地次之,建筑用地和耕地比较少,自然土壤类型主要包括黄壤、黄棕壤、棕壤、灰棕壤等。

### 1.2 数据来源与预处理

获取白沙河流域遥感影像、土地利用、DEM、地形图、降雨、土壤类型图等专题数据。所用基础数据详见表1。

表 1 白沙河流域基础数据

数据类型	时间	数据来源	影像参数	用途
遥感影像	20070615	SPOT 5	全色 2.5 m, 多光谱 10 m	植被覆盖度提取、 计算水土保持措施因子 $BET$
	20080813	SPOT 5	全色 2.5 m, 多光谱 10 m	
	20130827	ZY 3	全色 2 m, 多光谱 5.8 m	
	20180825	GF 2	全色 0.8 m, 多光谱 3.2 m	
	20200905	GF 2	全色 0.8 m, 多光谱 3.2 m	
DEM	—	PALSAR	12 m	流域地形地貌分析、 计算坡长坡度因子 $LS$
地形图	—	—	比例尺为 1:1 万	流域地形地貌分析、专题图制作
降雨	2007—2020	流域周边马尔康、红原、小金、松潘、温江、都江堰、广元、阆中、遂宁气象站	9 个国家级气象站台逐日气象观测数据	计算降雨侵蚀力因子 $R$
土壤类型图	—	南京土壤所制作的 1:100 万土壤类型图, 含土壤粒径和剖面属性信息	比例尺为 1:100 万	计算土壤可蚀性因子 $K$

### 1.3 研究方法

本研究基于 CSLE 模型计算土壤侵蚀模数。CSLE 模型<sup>[11]</sup>计算公式为:

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

式中:  $A$  为年单位面积的土壤侵蚀量  $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ;  $R$  为降雨侵蚀力因子  $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子  $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ;  $LS$  为坡长坡度因子(无量纲);  $B$  为生物措施因子(无量纲);  $E$  为工程措施因子(无量纲);  $T$  为耕作措施因子(无量纲)。

降雨侵蚀力因子  $R$  反映由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。降雨侵蚀力的计算采用第一次全国水利普查水土保持专项普查<sup>[17]</sup>使用的估算方法, 根据 2007—2020 年流域周边 9 个国家级气象站台的逐日降雨资料, 将小于 12 mm 日降雨量的非侵蚀性降雨剔除后, 计算各站点多年平均月降雨侵蚀力, 再根据计算结果进行空间插值。为方便比较, 本研究中统一采用克里金插值法获取白沙河流域降雨侵蚀力

(表 2)。具体计算方程改进自章文波等<sup>[18]</sup>提出的降雨侵蚀力估算模型。

$$\bar{R}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha \sum_{j=1}^M P_{dikj}^\beta) \quad (2)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967} \quad (3)$$

$$\beta = 0.6243 + \frac{27.346}{\bar{P}_{d_0}} \quad (4)$$

$$\bar{P}_{d_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^M P_{dikj} \quad (5)$$

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{12} \bar{R}_k \quad (6)$$

式中:  $\bar{R}_k$  为第  $k$  个月的降雨侵蚀力  $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ ;  $N$  为计算数据序列长度;  $M$  为第  $i$  年第  $k$  个月侵蚀性降雨的次数;  $P_{dikj}$  为第  $i$  年第  $k$  个月第  $j$  次侵蚀性降雨量 (mm), 取日降雨量  $\geq 12$  mm 作为侵蚀性降雨;  $\alpha, \beta$  为模型参数(无量纲);  $\bar{P}_{d_0}$  为侵蚀性降雨的多年平均值 (mm);  $\bar{R}$  为多年平均降雨侵蚀力  $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$ 。

表 2 白沙河流域周边国家级气象站海拔高度与降雨侵蚀力 ( $R$  值) 统计

站点编号	站点名	海拔高度/m	$R$ 值/ $(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$				
			2007 年	2008 年	2013 年	2018 年	2020 年
56172	马尔康	2 707	918.46	317.71	996.33	1 156.07	1 675.49
56173	红原	3 610	584.84	517.20	1 318.79	877.96	925.31
56178	小金	3 319	485.13	1 000.05	1 277.78	844.17	688.87
56182	松潘	4 049	693.15	440.76	1 291.60	655.64	855.16
56187	温江	511	2 206.23	6 010.80	10 603.55	4 772.16	5 103.24
56188	都江堰	2 023	3 291.83	5 948.18	21 307.53	5 822.42	6 630.58
57206	广元	606	5 450.11	4 784.33	8 606.41	2 517.05	2 846.14
57306	阆中	474	7 739.70	7 435.82	10 230.84	1 356.86	1 830.27
57405	遂宁	322	5 758.41	4 796.23	13 569.32	1 557.22	2 055.76

土壤可蚀性因子  $K$  反映土壤抵抗降雨侵蚀力作用的能力。本研究中,由于白沙河流域缺乏相应土壤资料,且流域中上游为无人区,试验获取相应参数较困难,故利用所需参数较少的 EPIC 模型<sup>[19]</sup>中的估算方法,结合中国科学院南京土壤所制作的土壤类型图,获取流域内土壤可蚀性  $K$  值分布情况。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.025 6 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{S_i}{C_i + S_i} \right) \times \left[ 1 - \frac{0.25 C}{C + \exp(3.72 - 2.95 C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7 S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9 S_a)} \right] \quad (7)$$

$$S_n = 1 - S_a / 100 \quad (8)$$

式中: $S_a$  为粒径 0.05~2 mm 砂粒的百分含量; $S_i$  为粒径 0.002~0.05 mm 粉砂的百分含量; $S_n$  为除粒径 0.05~2 mm 砂粒之外其他土壤颗粒的百分含量; $C_i$  为粒径 <0.002 mm 黏粒的百分含量; $C$  为有机碳的百分含量。由于国外和我国的土壤可蚀性实测值具有明显的差异,由上述公式(7)~(8)计算的值通常偏大于实际值,故进一步利用张科利等<sup>[20]</sup>研究成果,计算得到修正的土壤可蚀性因子。

$$K_{\text{rejest}} = 0.515 7 K_{\text{epic}} - 0.013 8 \quad (9)$$

坡长坡度因子  $LS$  反映地形地貌特征。本研究采用杨子生等<sup>[21]</sup>修正模型计算坡长因子  $L$ ,采用刘斌涛等<sup>[22]</sup>基于西南土石山区典型流域水土流失观测

资料建立的坡度因子计算公式计算  $S$ 。

$$L = \frac{\lambda^{0.24}}{20} \quad (10)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta \leq 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & (5^\circ < \theta \leq 10^\circ) \\ 20.204 \sin \theta - 1.240 4 & (10^\circ < \theta \leq 25^\circ) \\ 29.585 \sin \theta - 5.607 9 & (\theta > 25^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $L$  为坡长因子; $S$  为坡度因子; $\lambda$  为坡长(m); $\theta$  为坡度( $^\circ$ )。

水土保持措施因子 BET 反映水土保持措施对土壤侵蚀的控制作用。CSLE 模型将水土保持措施因子区分为生物措施因子( $B$ )、工程措施因子( $E$ )和耕作措施因子( $T$ )。本研究基于像元二分模型计算植被覆盖度,采用谢红霞<sup>[23]</sup>提出的算法(表 3—4)计算生物措施因子和耕作措施因子,工程措施因子取值 1。

表 3 不同土地利用和植被覆盖度下的  $B$  值

土地利用类型	植被覆盖度/%	$B$ 值	土地利用类型	植被覆盖度/%	$B$ 值
	0~20	0.100		0~20	0.450
	20~40	0.080		20~40	0.240
林地	40~60	0.060	草地	40~60	0.150
	60~80	0.020		60~80	0.090
	80~100	0.004		80~100	0.043
水域	—	0	坡耕地	—	0.476
建设用地	—	0.353	平耕地	—	0.230

表 4 不同坡度下耕作因子  $T$  值

坡度/ $^\circ$	$\leq 1$	1~3	3~9	9~13	13~17	17~21	21~25	$> 25$
$T$ 因子值	0.74	0.59	0.60	0.62	0.68	0.75	0.81	0.92

以 2020 年为例,各侵蚀因子计算结果如图 1 所示。在 ArcGIS 软件中,将各因子重采样为 10 m 空间分辨率的栅格数据,利用栅格计算器计算土壤侵蚀模数,按照《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》完成白沙河流域土壤侵蚀强度综合评价,定量分析白沙河流域土壤水力侵蚀(以下简称土壤侵蚀)的时空变化特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 白沙河流域 2020 年土壤侵蚀状况分析

2020 年白沙河流域土壤侵蚀强度分级情况详见表 5。流域内 2020 年土壤侵蚀总量为  $5.61 \times 10^5$  t,平均侵蚀模数为 1 558.37 t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),属于轻度侵蚀。从各级侵蚀强度所占面积来看,微度侵蚀面积占流域总面积的 14.06%,而轻度侵蚀所占面积比率最大,为 68.13%,土壤侵蚀强度总体上以轻度侵蚀为主。中

度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀所占的面积比率依次减小。值得注意的是,强烈侵蚀及以上的面积比率之和为 6.88%,其贡献的土壤侵蚀量占总量的 37.44%,表明白沙河流域的土壤侵蚀状况具有局部区域发生高强度土壤侵蚀的特征。结合图 2 来看,高强度土壤侵蚀区域呈片状、块状分布,片状区域主要分布在海拔高、坡度大的区域,块状区域主要沿着白沙河流域上游干支流河谷区分布。

2.1.1 坡度分级对土壤侵蚀空间分布的影响 从不同坡度分级看,平均土壤侵蚀模数随坡度增大而逐渐增加(表 6)。0°~15°的平均土壤侵蚀模数为 335.27 t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),属于微度侵蚀。15°~55°的平均土壤侵蚀模数均小于 2 500 t/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ),属于轻度侵蚀。35°以上区域侵蚀量比率大于面积比率,该区域面积占流域总面积的 69.29%,其贡献的土壤侵蚀量占全年总量的 85.44%。55°以上区域土壤侵蚀相对严重,

平均土壤侵蚀模数为  $2\,776.61\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 属于中度侵蚀。这主要与陡坡区域多分布由地震形成的破

碎松动坡体有关, 该区域林草植被破坏严重, 自然恢复条件下尚未演替形成郁闭良好的植被群落结构。

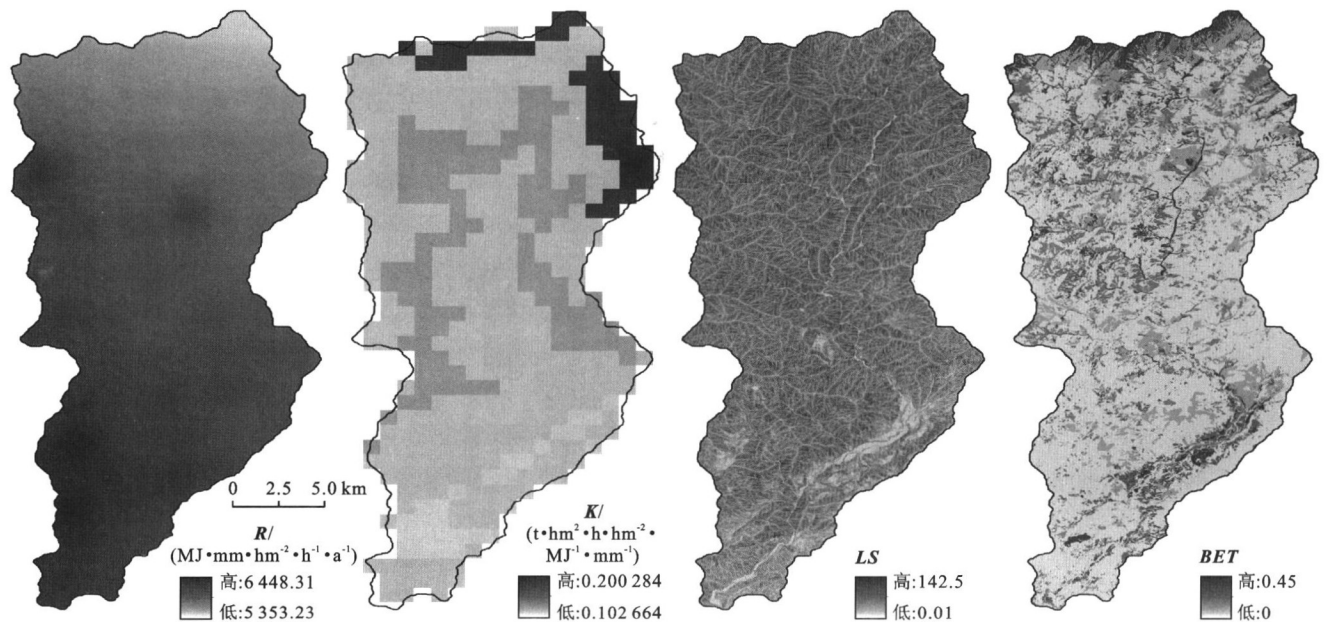


图 1 白沙河流域 2020 年降雨侵蚀力( $R$ )、土壤可蚀性( $K$ )、坡长坡度( $LS$ )、水土保持措施因子( $BET$ )分布

表 5 白沙河流域 2020 年土壤侵蚀强度分级

侵蚀强度分级/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	面积/ $\text{km}^2$	年侵蚀量/ $10^4\text{ t}$	侵蚀模数/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	面积比率/ %	侵蚀量比率/ %
微度侵蚀(<500)	50.64	1.94	383.26	14.06	3.46
轻度侵蚀(500~2 500)	245.35	22.09	900.41	68.13	39.36
中度侵蚀(2 500~5 000)	39.37	11.08	2 813.93	10.93	19.74
强烈侵蚀(5 000~8 000)	10.77	6.72	6 240.17	2.99	11.98
极强烈侵蚀(8 000~15 000)	10.36	8.73	8 429.98	2.88	15.56
剧烈侵蚀( $\geq 15\,000$ )	3.64	5.56	15 262.46	1.01	9.90

表 6 白沙河流域 2020 年不同坡度分级的土壤侵蚀强度与面积

坡度/( $^\circ$ )	面积/ $\text{km}^2$	年侵蚀量/ $10^4\text{ t}$	侵蚀模数/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	面积比例/ %	侵蚀量比例/ %
0~15	14.00	0.47	335.27	3.89	0.84
15~25	28.24	1.51	536.09	7.84	2.70
25~35	68.36	6.19	905.42	18.98	11.03
35~45	133.35	21.87	1 639.85	37.03	38.97
45~55	92.62	19.54	2 109.90	25.72	34.82
$\geq 55$	23.54	6.54	2 776.61	6.54	11.65

2.1.2 海拔梯度对土壤侵蚀空间分布的影响 白沙河流域内不同海拔上的土壤侵蚀强度与面积详见表 7。总体来看, 平均土壤侵蚀模数随海拔的升高而增加。海拔  $< 1\,000\text{ m}$  时, 平均土壤侵蚀模数为  $450.97\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 属于微度侵蚀, 这是因为低海拔区域坡度小, 植被覆盖良好, 土壤侵蚀强度相对较弱。海拔  $1\,000 \sim 4\,000\text{ m}$  的区域平均土壤侵蚀模数均小于  $2\,500\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 属轻度侵蚀。海拔  $> 2\,000\text{ m}$  的

区域占流域总面积的 55.19%, 其贡献的土壤侵蚀量占全年总量的 68.20%。海拔  $> 4\,000\text{ m}$  的区域面积比例仅 1.00%, 平均土壤侵蚀模数为  $5\,036.41\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 发生强烈侵蚀, 该区域主要分布在龙门山沿线, 是小面积高强度土壤侵蚀的发生区, 区域内多为高山裸地或荒草地, 地形坡度大, 由于汶川地震导致山体土壤松动, 在强降雨的冲刷下易发生强烈土壤侵蚀。

表7 白沙河流域2020年不同海拔梯度的土壤侵蚀强度与面积

海拔/m	面积/km <sup>2</sup>	年侵蚀量/ 10 <sup>4</sup> t	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	面积比例/ %	侵蚀量比例/ %
<1 000	13.22	0.60	450.97	3.67	1.06
1 000~2 000	148.15	17.25	1 164.48	41.14	30.74
2 000~3 000	142.94	23.58	1 649.48	39.69	42.01
3 000~4 000	52.23	12.89	2 467.68	14.50	22.96
≥4000	3.59	1.81	5 036.41	1.00	3.22

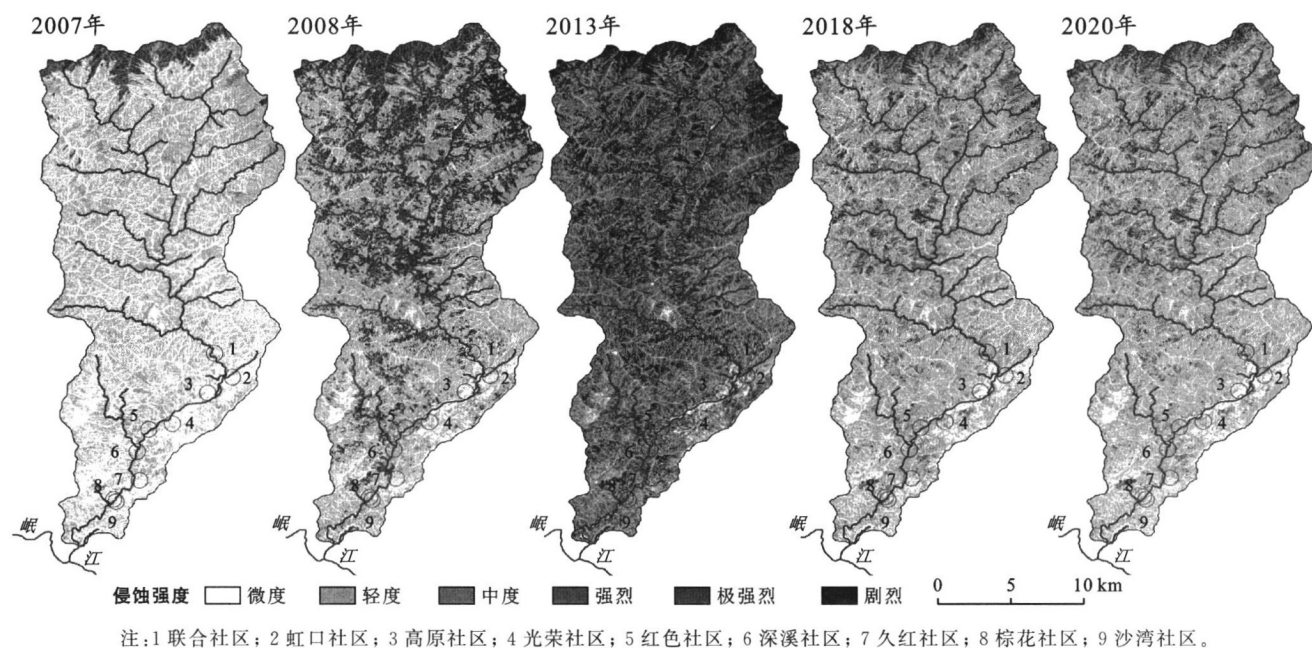


图2 白沙河流域2007—2020年土壤侵蚀强度分级

## 2.2 近10 a来白沙河流域土壤侵蚀动态变化分析

2.2.1 总体变化情况 白沙河流域在2007,2008,2013,2018和2020年的年均土壤侵蚀模数分别为817.51,3 000.11,5 828.89,1 549.76和1 558.37 t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量分别为2.94×10<sup>5</sup> t,1.08×10<sup>6</sup> t,2.10×10<sup>6</sup> t,5.58×10<sup>5</sup> t和5.61×10<sup>5</sup> t,流域平均土壤侵蚀强度经历了由轻度侵蚀到中度侵蚀、强烈侵蚀,再转为轻度侵蚀的变化过程(表8)。结合图2可以看出,2007年白沙河流域中度侵蚀及以上等级的土壤侵蚀面积较少,且集中分布在白沙河流域北部龙门山沿线、篾笼子沟、正沟附近。

2008年相比于2007年,白沙河流域整体土壤侵蚀强度大幅提高,尤其是龙门山沿线、流域内河流周边河谷区的土壤侵蚀强度陡然加剧。主要原因是2008年汶川地震引发了大面积的崩塌、滑坡等次生地质灾害,使得白沙河流域植被、土壤等下垫面情况受到严重破坏,极大增强了流域内的土壤侵蚀强度。2013年与2008年相比,白沙河流域整体土壤侵蚀强度继续增强,且侵蚀分布范围有进一步扩大的趋势,这主要是因为2013年的降雨侵蚀力为16 742.45

[(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)],远大于2008年的5 155.79 [(MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a)],且流域灾后恢复重建、生态旅游开发等活动也会造成部分地表扰动,加剧流域的土壤侵蚀。

白沙河流域各期微度侵蚀的面积比例依次为44.61%,17.73%,2.79%,20.57%和14.06%,自2007—2013年减少了41.82%,2020年时的微度侵蚀面积已有所恢复,但2020年中度及以上强度侵蚀面积比例仍达到17.81%,是地震前(2007年)的4.13倍。各个时期的高强度侵蚀(包括强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀)面积占流域面积比率分别为1.95%,20.52%,30.88%,5.15%和6.88%,高强度侵蚀区域对当年土壤侵蚀总量的贡献值分别为5.24×10<sup>4</sup> t,7.46×10<sup>5</sup> t,1.46×10<sup>6</sup> t,1.68×10<sup>5</sup> t和2.10×10<sup>5</sup> t,分别占当年土壤侵蚀总量的17.80%,69.07%,69.75%,30.12%,37.44%。可以看出2008年地震后白沙河流域高强度侵蚀面积陡然增加,截至2013年,高强度侵蚀产生的土壤侵蚀量仍在年土壤侵蚀总量中占主导地位,到2020年时仍存在小面积区域内发生高强度土壤侵蚀的特点。

表 8 白沙河流域 2007, 2008, 2013, 2018 和 2020 年土壤侵蚀强度统计

侵蚀强度分级	2007 年		2008 年		2013 年		2018 年		2020 年	
	面积/ km <sup>2</sup>	年侵蚀 量/10 <sup>4</sup> t	面积/ km <sup>2</sup>	年侵蚀 量/10 <sup>4</sup> t	面积/ km <sup>2</sup>	年侵蚀 量/10 <sup>4</sup> t	面积/ km <sup>2</sup>	年侵蚀 量/10 <sup>4</sup> t	面积/ km <sup>2</sup>	年侵蚀 量/10 <sup>4</sup> t
微度侵蚀	160.66	4.74	63.84	1.98	10.04	0.22	74.09	2.32	50.64	0.47
轻度侵蚀	183.94	16.43	196.20	21.84	114.41	18.47	239.93	27.33	245.35	1.51
中度侵蚀	8.51	3.03	26.18	9.59	124.47	44.81	27.55	9.33	39.37	6.19
强烈侵蚀	4.82	3.03	27.12	17.60	50.33	31.22	8.96	5.68	10.77	21.87
极强烈侵蚀	2.13	2.10	38.29	41.25	33.65	36.05	8.28	8.77	10.36	19.54
剧烈侵蚀	0.07	0.11	8.48	15.77	27.24	79.15	1.31	2.36	3.64	6.54
合计	360.12	29.44	360.12	108.04	360.12	209.91	360.12	55.81	360.12	56.12
年均侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	817.51		3 000.11		5 828.89		1 549.76		1 558.37	

2.2.2 降雨侵蚀力对土壤侵蚀动态变化的影响 降雨侵蚀作用对白沙河流域的土壤侵蚀变化驱动作用明显(图 3),白沙河流域 2007, 2008, 2013, 2018 和 2020 年平均降雨侵蚀力分别为 3 000.65, 5 155.79, 16 742.45, 4 750.16 和 5 901.27 (MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h·a), 流域年均土壤侵蚀模数和降雨侵蚀力相关性显著 ( $R^2=0.86$ )。

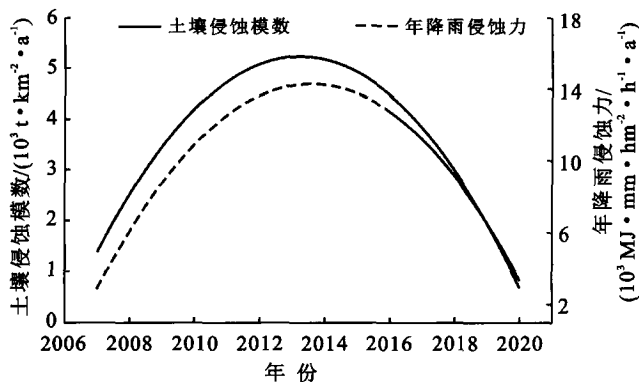


图 3 白沙河流域 2007—2020 年土壤侵蚀模数和年降雨侵蚀力变化

### 3 讨论

白沙河流域中上游为无人区,山高坡陡,自然条件恶劣,开展水土流失地面观测获取实测数据较困难,缺乏时间序列的径流泥沙监测资料。故本文利用遥感影像和 CSLE 模型,在统一的估算方法下,研究白沙河流域土壤侵蚀强度的时空变化规律,揭示汶川地震前后的土壤侵蚀特征。研究区 2008 年的平均土壤侵蚀模数为 3 000.11 t/(km<sup>2</sup>·a),与姜琳等<sup>[3]</sup>在岷江上游基于 RUSLE 模型的研究结果 3 309.26 t/(km<sup>2</sup>·a)较接近,模型的计算结果有一定的合理性。

“5·12”地震对白沙河流域以自然植被为主的生态环境造成了巨大破坏,众多学者针对汶川地震灾区生态环境的受损程度及震后一段时间的生态恢复情

况进行了相关研究<sup>[24]</sup>,认为近 10 a 来地震灾区植被生态系统总体趋于稳定向好的恢复态势。本研究遥感解译结果同样可见流域植被覆盖度呈先大幅减少、后缓慢增加的趋势,白沙河流域 2007—2020 年各期平均植被覆盖度分别为 73.74%, 60.51%, 65.43%, 68.92%, 70.81%。土壤侵蚀与植被覆盖关系密切,一定条件下,植被覆盖度的提高可以大大减少土壤侵蚀<sup>[25-26]</sup>。从本研究结果来看,白沙河流域 2013 年的植被覆盖度比 2008 年地震后更高,但 2013 年土壤侵蚀量是 2008 年地震后的 197.74%,这一方面与流域内地震扰动坡地的植被恢复情况有关,研究证实物种丰富度比植物盖度更能指示生态系统对土壤侵蚀控制的服务功能<sup>[27]</sup>,2013 年虽然地震受损创面得到一定程度的恢复,但处于植被演替初级阶段,种类组成以先锋植物为主,多样性不足,群落结构简单<sup>[24]</sup>。另一方面流域土壤侵蚀受到极端气候事件的影响,2013 年白沙河流域降雨量达到 1 968 mm,尤其 7 月日降水量超过有记录以来的最大值,2013 年降雨侵蚀力为 2008 年的 3.25 倍(图 3)。

本研究对于认清地震前后区域土壤侵蚀变化规律和指导类似地震影响区域开展水土保持工作具有一定现实意义,但仍存在以下不足。由于条件限制,缺乏径流泥沙监测资料与核素示踪实测结果,实地验证数据不足,仅通过类似研究成果进行对比验证;研究选用间隔 5 a 的遥感影像,只能表达一定时间段内的趋势状况,对于每年的具体情况不能全部反映表达;CSLE 模型在使用时,各因子的算法很多,本文综合考虑研究区的特点选择合适的计算方法,但尚未保证该计算方法能够完全符合研究区的具体情况,并且 CSLE 模型只能计算面蚀强度,无法体现沟蚀和重力侵蚀,这也是其他相关研究中存在的共性问题<sup>[13-15]</sup>。

### 4 结论

(1) 白沙河流域 2020 年土壤侵蚀模数为 1 558.37

t/(km<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量为5.61×10<sup>5</sup> t,属轻度侵蚀。随着坡度或海拔的增加,土壤侵蚀模数逐渐增加,坡度35°以上和海拔2 000 m以上的区域贡献的土壤侵蚀量分别占2020年总量的85.44%,68.20%,海拔高于4 000 m的区域平均土壤侵蚀模数大于5 000 t/(km<sup>2</sup>·a),属强烈侵蚀。

(2)白沙河流域2007,2008,2013,2018和2020年的年均土壤侵蚀模数分别为817.51,3 000.11,5 828.89,1 549.76,1 558.37 t/(km<sup>2</sup>·a)。地震后,微度侵蚀面积明显减少,高强度侵蚀面积抬升,轻度及以上侵蚀强度分布范围明显扩大,2020年时土壤侵蚀整体情况已有所好转,但受地震影响严重的龙门山高海拔区仍表现出小面积区域发生高强度土壤侵蚀的特征。

(3)2007—2020年白沙河流域土壤侵蚀模数的变化主要受降雨侵蚀力驱动影响,近10 a来白沙河流域植被覆盖度在60%~74%之间,但坡度较陡,暴雨径流发育,地震后5 a内土壤侵蚀模数居高位,2013—2020年土壤侵蚀模数逐渐降低。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Ran Lishan, Lu Xixi, Xu Jianchu. Effects of vegetation restoration on soil conservation and sediment loads in China: A critical review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, 43(13):1384-1415.
- [2] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报[R]. 水利部, 2020.
- [3] 姜琳, 边金虎, 李爱农, 等. 岷江上游2000—2010年土壤侵蚀时空格局动态变化[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 18-25.
- [4] 刘金山, 倪福全, 邓玉, 等. 岷江上游流域土壤侵蚀风险评估[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1):105-112.
- [5] 赵芹, 廖睿智, 杜鹃, 等. 汶川地震灾区水土流失动态变化及原因分析[J]. *中国水土保持*, 2019(12): 20-22.
- [6] 周正朝, 上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1):52-56.
- [7] 谢红霞, 郭丽英. 经验水蚀预报模型的国内外研究进展[J]. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(2):1-8.
- [8] Alewell C, Borrelli P, Meusburger K, et al. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(3):203-225.
- [9] Benavidez R, Jackson B, Maxwell D, et al. A review of the (revised) universal soil loss equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(11):6059-6086.
- [10] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Washington D C: U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
- [11] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C]. *Proceedings of the 12th International Soil Conservation Organization Conference*, Beijing, China. 2002:26-31.
- [12] Tang Qiang, He Xiubin, Bao Yuhai, et al. Determining the relative contributions of climate change and multiple human activities to variations of sediment regime in the Minjiang River, China [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(25):3547-3559.
- [13] 王铭烽. 三峡库区水库运行前后土壤侵蚀动态变化及人为驱动机制[D]. 四川 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
- [14] Chen Guokun, Zhang Zengxiang, Guo Qiankun, et al. Quantitative assessment of soil erosion based on CSLE and the 2010 national soil erosion survey at regional scale in Yunnan Province of China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(12):3252.
- [15] Duan Xingwu, Bai Zhiwei, Rong Li, et al. Investigation method for regional soil erosion based on the Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan Province, China [J]. *Catena*, 2020, 184:104237.
- [16] 王锐亮. 川北紫色土深丘区小流域降雨及土壤侵蚀特征分析[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [17] 李智广, 刘宪春, 刘建祥, 等. 第一次全国水利普查水土保持普查方案[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(3):87-91.
- [18] 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.
- [19] United States Department of Agriculture. EPIC-erosion/productivity impact calculator (I): Model documentation [R]. USA: USDA-ARS, 1990.
- [20] 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.
- [21] 杨子生. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J]. *山地学报*, 2002, 20(S1):1-9.
- [22] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. *中国水土保持*, 2015(8): 49-51.
- [23] 谢红霞, 杨勤科, 李锐, 等. 延河流域水土保持措施减蚀效应分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4):13-19.
- [24] 杨渺, 江腊海, 侯鹏, 等. “5·12”汶川地震极重灾区灾后十年生态恢复状况评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11):2541-2550.

(下转第89页)



- 沙林土壤养分特征研究[J].西北林学院学报,2018,33(2):1-9.
- [10] 张选,肖薪龙,李鹏勃,等.新疆杨不同成熟度叶片在胁迫下的生理响应[J].林业科学,2015,51(12):9-16.
- [11] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山5种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.
- [12] 桑巴叶,朱玉伟,陈启民,等.新疆杨不同林龄农田防护林的碳储量[J].南方农业学报,2015,46(8):1455-1461.
- [13] 王雄.阿拉尔垦区农田防护林结构特征及其防护效益研究[D].新疆阿拉尔:塔里木大学,2020.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 张天霖,邱治军,吴仲民,等.粤北针阔混交林不同器官碳氮磷钾的生态化学计量特征[J].林业科学研究,2021,34(2):149-157.
- [16] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000,3(6):540-550.
- [17] Han Wenxuan, Fang Jingyun, Guo Dali, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [18] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等.云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C, N, P化学计量特征[J].生态学报,2010,30(23):6581-6590.
- [19] 王晶苑,王绍强,李幼兰,等.中国4种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征[J].植物生态学报,2011,35(6):587-595.
- [20] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等.河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2011,31(23):134-139.
- [21] 王平安,宫渊奇,王琪,等.不同林龄华北落叶松人工林针叶—凋落叶—土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2020,35(6):1-9.
- [22] 崔宁洁,刘小兵,张丹桔,等.不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J].生态环境学报,2014,23(2):188-195.
- [23] 吕永磊,梁文业,张仲胜.西藏地区典型泥炭地土壤理化性质及其碳、氮、磷化学计量学特征[J].湿地科学,2017,15(4):526-531.
- [24] 杨晶晶,吕瑞恒,梁继业,等.塔里木盆地盐生和干旱生境柽柳(*Tamarix*)凋落物分解特征[J].中国沙漠,2020,40(1):215-222.
- [25] 孟庆权,葛露露,林宇,等.杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J].江西农业大学学报,2018,40(6):1155-1162.
- [26] 王凯,吴祥云,卢慧,等.阜新市主要园林树种叶片生态化学计量特征[J].干旱区研究,2013,30(2):236-241.
- [27] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
- [28] 阎恩荣,王希华,郭明,等.浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的C:N:P化学计量特征[J].植物生态学报,2010,34(1):48-57.
- [29] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Zhang Chi, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010,98(1):139-151.
- [30] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [31] 张继辉,蔡道雄,卢立华,等.不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(16):5718-5728.
- [32] 朱海强,李艳红,张小萌.艾比湖湿地不同植物群落下土壤全磷空间变异[J].水土保持研究,2017,24(5):45-50.

(上接第81页)

- [25] Ouyang Wei, Hao Fanghua, Skidmore A K, et al. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River [J]. Science of the Total Environment, 2010,409(2):396-403.
- [26] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed [J]. Catena, 2008,75(3):319-325.
- [27] 焦菊英,王宁,杜华栋,等.土壤侵蚀对植被发育演替的干扰与植物的抗侵蚀特性研究进展[J].草业学报,2012,21(5):311-318.