

# 孟连县土壤侵蚀时空变化特征

高翔宇<sup>1</sup>,王 刚<sup>2</sup>,赵筱青<sup>1\*</sup>

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院,云南 昆明 650091; 2. 昆明南方地球物理技术  
开发有限公司,云南 昆明 650231)

**摘要:** 为了评估孟连县地区土壤侵蚀状况,为当地水土流失防治和水土保持工作提供理论依据,以通用土壤流失方程(USLE)为模型,运用 ArcGIS 和 ENVI 软件,综合分析了研究区土壤侵蚀时空变化特征以及不同环境背景下的土壤侵蚀特征。结果表明,2010 年孟连县土壤侵蚀相比 2000 年有所减轻,土壤侵蚀模数分别为 104.25 t/(hm<sup>2</sup>·a)和 64.11 t/(hm<sup>2</sup>·a),分属极强度侵蚀和强度侵蚀;从空间分布来看,孟连县 2000 年和 2010 年的土壤侵蚀格局基本是东部相对较轻,西部相对严重,均以公信乡土壤侵蚀最严重,相对较轻的是景信乡、娜允镇。在一定降水强度(800≥R≥600)下,土壤侵蚀强度总体随降水强度的升高而升高;当 R>800 时,土壤侵蚀强度随降水强度的升高而降低。土壤侵蚀强度随着坡度的增加而增大,侵蚀主要集中于 8°~35°坡度区域。赤红壤、红壤、砖红壤的侵蚀相对严重,黄壤最轻。坡度大于 15°的旱地土壤侵蚀最严重,其次为荒草地和灌木林,水田和建设用地土壤侵蚀较轻。

**关键词:** 土壤侵蚀;通用土壤流失方程(USLE);ArcGIS;时空特征;孟连县

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2015)12-0045-09

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Erosion in Menglian County

GAO Xiangyu<sup>1</sup>,WANG Gang<sup>2</sup>,ZHAO Xiaoqing<sup>1\*</sup>

(1. School of Resource Environment and Earth Science,Yunnan University,Kunming 650091,China;  
2. Kunming Southern Geophysical Technology Development Co. Ltd.,Kunming 650231,China)

**Abstract:** In order to assess the soil erosion conditions in Menglian country and provide basis for the prevention and treatment of soil erosion as well as conservation of water and soil,the spatial and temporal variation characteristics of soil erosion and soil erosion characteristics under different environmental conditions were analyzed using ArcGIS and ENVI softwares with universal soil loss equation (USLE) model. The results showed that the soil erosion of Menglian county in 2010 had been reduced compared with that in 2000, and the soil erosion modulus were 104.25 t/(ha·a) and 64.11 t/(ha·a) respectively, belonging to very intensive erosion and intensive erosion. From the aspect of space distribution,basically,the soil erosion pattern of 2000 and 2010 were relatively not serious in eastern area and relatively serious in western area. The soil erosion in Gongxin country was the most serious in this two years,Jingxin country and Nayun town were relatively mild. Under a certain rainfall intensity(800≥R≥600),on the whole,the intensity of soil erosion increased with the increase of rainfall intensity; when R was more than 800,the intensity of soil erosion decreased with the increase of rainfall intensity. The soil erosion intensity increased with the increase of slope,and the erosion mainly occurred in 8°—35° slope

收稿日期:2015-07-10  
基金项目:国家自然科学基金项目(41361020,40961031)  
作者简介:高翔宇(1991-),男,河南南阳人,在读硕士研究生,研究方向:土壤侵蚀和土地利用优化。  
E-mail:1324543600@qq.com  
\* 通讯作者:赵筱青(1969-),女,云南大理人,教授,博士,主要从事生态环境与景观安全格局研究。  
E-mail:zhaoxq748@sohu.com

area. The erosion level of lateritic red soil, red soil and brick-red erosion were relatively serious, while the erosion level of yellow soil was the lightest one. As to upland soil with the slope more than  $15^{\circ}$ , the erosion level was the most serious, followed by grassland and shrubbery, and paddy fields and construction sites had the slightest soil erosion.

**Key words:** soil erosion; universal soil loss equation; ArcGIS; temporal and spatial characteristics; Menglian county

土壤侵蚀作为地球表面普遍存在的自然现象,是土壤或成土母质在水力、重力等外力作用下发生剥蚀、搬运和沉积的过程。土壤侵蚀不仅破坏土地资源,还会引发土地退化、土壤肥力下降、泥沙淤积等问题。根据第 2 次全国土壤侵蚀遥感调查结果,我国土壤水蚀和风蚀面积达  $3.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 37.6%<sup>[1]</sup>, 并且分布类型多、范围广、强度大、危害严重<sup>[2]</sup>。因此,对土壤侵蚀进行监测和预报具有现实意义。

国内外学者对土壤侵蚀的发生规律已进行了大量研究,其研究方法主要有 3 种:模型法、同位素示踪法和 GIS/RS 技术法。在该研究过程中,侵蚀模型是进行土壤侵蚀监测和预报的重要工具<sup>[3]</sup>。按照研究方法、途径和目的的不同,土壤侵蚀模型大致可分为物理过程模型,如水力侵蚀预报模型 (WEPP) 和欧洲土壤侵蚀模型<sup>[4]</sup>,主要用于研究侵蚀产沙规律;动力学模拟模型,如动力侵蚀模型 (Kineros)<sup>[5]</sup>,主要研究侵蚀产沙的时间序列、微观运移以及流域下垫面与侵蚀产沙的相互关系;因子分析模型,如通用土壤流失方程 (USLE) 和修订的通用土壤流失方程 (RUSLE)<sup>[6-7]</sup>,以因子分析方法为基础,通过数理统计方法,拟合出相关模型<sup>[8]</sup>,主要用于研究一定坡度的坡面年土壤侵蚀量预报及计算不同土地利用类型或方式的土壤侵蚀量。相比其他模型,以 USLE 为代表的因子分析模型直观、简便,可以根据具体的区域进行因子的调整,实用性极强<sup>[9]</sup>,是应用最广的土壤侵蚀速率估计模型,现在被大量应用于区域尺度研究<sup>[10]</sup>。Boyle 等<sup>[11]</sup>利用 USLE 模型研究了加利福尼亚州平托胡土壤侵蚀量及产沙量;洪华生等<sup>[12]</sup>基于 USLE 模型对下庄小流域的土壤侵蚀量进行了预测和估算;邹金浪等<sup>[13]</sup>借助 USLE 模型分析了江西省兴国县的土壤侵蚀敏感性及其空间自相关性;柳长顺等<sup>[14]</sup>基于 USLE 模型分析了土地利用变化和土壤侵蚀的关系;邱扬等<sup>[15-16]</sup>应用 USLE 模型完成了中等流域 (延河) 的土壤侵蚀评价研究。20 世纪 90 年代以来,将模型和 3S 技术有机融合成为研究土壤侵蚀的一种有效

方式。土壤侵蚀作为一个动态变化的过程,基于 3S 技术可以更好地了解其变化情况。目前,将 USLE 模型与 3S 技术结合进行土壤侵蚀研究的报道很多,主要集中于土壤侵蚀量的估测与评价、土壤侵蚀特征分析以及水土流失敏感性分析等方面<sup>[17-20]</sup>,在县域范围这样的宏观层面上分析土壤侵蚀时空变化特征的研究较少。

孟连县位于云南省的西南部,南部多高山峻岭,而东西部偏低,多河谷盆地,降雨丰富且具有季节性,土壤侵蚀问题较严重,国内对该地区土壤侵蚀情况的研究未见报道。为此,将 GIS 和 USLE 相结合,对研究区土壤侵蚀进行定量分析,研究土壤侵蚀时空变化特征及不同环境背景下的土壤侵蚀分布特征,以便有效指导当地的水土流失防治工作。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

孟连县位于云南省西南部 ( $99^{\circ}09' \sim 99^{\circ}46' \text{ E}$ 、 $22^{\circ}05' \sim 22^{\circ}32' \text{ N}$ ), 隶属普洱市, 县域面积  $1\,893.49 \text{ km}^2$ 。下辖 3 个镇 (芒信镇、勐马镇、娜允镇)、3 个乡 (富岩乡、公信乡、景信乡)。该县地处横断山脉和怒山山脉南端, 县内整个地势似马鞍形状, 从东北向西南倾斜, 全县地形属于以山区为主、谷坝相间的复合类型, 并且海拔高差大, 最高海拔  $2\,603 \text{ m}$ , 最低海拔  $500 \text{ m}$ , 气候垂直变化明显, 属南亚热带湿润气候类型, 降雨量充沛, 但季节分配不均, 5—10 月为雨季。该县河流较多, 地带性土壤从低到高排列有砖红壤、赤红壤、红壤、黄棕壤; 非地带性土壤有水稻土、冲积土。全县土壤侵蚀严重, 2010 年土壤侵蚀面积占到县域面积的 95% 以上。

### 1.2 数据来源

本研究使用的数据包括: 2000 年、2010 年孟连县境内 6 个气象站点每个月的降水数据、地形数据、土壤类型数据、土地利用类型数据和植被类型数据。其中, 地形数据是根据中国科学院地理空间数据云的数字高程模型 (DEM) 数据, 经过对坡度和坡长的提取计算, 最终生成  $30 \text{ m}$  栅格数据; 土壤类型数据

来自全国第 2 次普查数据库;土地利用类型数据来自 2000 年 3 月和 2010 年 3 月的 2 期分辨率为 30 m 的 Landsat 7 ETM 遥感数据,通过实地考察采样,结合土地变更数据与第 2 次全国土地调查数据进行判读和解译,并以中国《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2007)为依据,再结合孟连县土地利用现状,建立土地利用数据库;植被类型数据同样是以 Landsat 7 ETM 数据为基础,并基于 ENVI 软件进行判读和解译;降水数据在 ArcGIS 软件中采用克里格插值法(Kriging)生成栅格数据。为了便于计算,所有栅格数据输出像元应统一为大小 30 m、UTM 投影、WGS1984 坐标。

1.3 土壤侵蚀模型的构建

1.3.1 土壤侵蚀模型的确定 应用于土壤侵蚀研究的模型有很多,世界各国针对各自国家不同区域土壤侵蚀发生的不同背景和机制,开发了各具特色的侵蚀模型。孟连县属于典型的高山峡谷区,地形起伏大,相对高差明显,地质地貌复杂,流域面积广,有关资料的收集相对困难。结合研究区的地理位置、地形条件等因素考虑选用 USLE 模型。USLE 模型在一定程度上克服了区域性研究的局限,借助地理信息系统和遥感等手段,广泛应用于土壤侵蚀定量评价<sup>[21]</sup>,并且可以根据具体的区域进行因子的调整,计算简便,实用性极强,可以快速地对研究区的土壤侵蚀情况进行定量计算,方便决策者制定有关水土保持政策。总的来讲,其具有实用性和经济性等特点,计算公式如下。

$$Ar = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

式中:Ar 为单位面积上的年土壤侵蚀量,R 为降雨侵蚀力因子,K 为土壤可蚀性因子,L 为坡长因子,S 为坡度因子,C 为植被覆盖因子,P 为水土保持措施因子。

土壤侵蚀模数是指单位面积土壤及土壤母质在单位时间内的侵蚀量大小,反映的是平均土壤侵蚀速率,其计算方法很多,大多是在通用土壤流失方程 USLE 的基础上修改形成的。本研究中,用土壤侵蚀模数来表征研究区土壤侵蚀强度。根据国家水利部颁布的《土壤侵蚀分级分类标准》(SL 190—2007)<sup>[22]</sup>,将研究区土壤侵蚀等级划分为 6 级:即每年每公顷的土壤侵蚀量小于 5 t 为微度侵蚀,介于 5 ~ 25 t 为轻度侵蚀,介于 25 ~ 50 t 为中度侵蚀,介于 50 ~ 80 t 为强度侵蚀,介于 80 ~ 150 t 为极强度侵蚀,150 t 以上为剧烈侵蚀。

1.3.2 降雨侵蚀力因子(R)的计算 降雨侵蚀力反映降雨这一气候因素对土壤侵蚀的潜在作用能力,与降雨量、降雨强度、历时、雨滴的大小以及雨滴下降终点速度有关<sup>[23]</sup>。许多学者针对各自的研究区提出了 R 值的计算公式,考虑到研究区的实际情况,本研究采用杨子生<sup>[24]</sup>对云南省高山峡谷区实测数据提出的 R 值计算模型。

$$R = 0.444\ 88p^{0.969\ 82} \tag{2}$$

式中:p 为年平均降雨量。孟连县历年降雨呈现明显季节性特征,雨量集中于 5—10 月,占全年降雨量的 85% 以上,因此用 5—10 月的多年平均降雨量来计算降雨侵蚀力因子。

1.3.3 土壤可蚀性因子(K)的计算 土壤可蚀性与土壤有机质含量、机械组成、渗透性、土壤结构有关,反映土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运的难易程度,一般通过小区试验测定<sup>[25]</sup>。一般说来,质地越粗或越细的土壤 K 值越低,而质地适中的土壤 K 值较高<sup>[26]</sup>。本研究根据全国第 2 次土壤普查数据库以及研究区的实地调查与测算,确定研究区不同土壤类型的 K 值(表 1)。

表 1 不同土壤类型的 K 值

土壤类型	$K/[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$	土壤类型	$K/[t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$
泥质山地黄壤	0.087	泥质黄色砖红壤	0.214
灰岩山地黄壤	0.192	水稻土	0.227
暗紫黄棕壤	0.167	紫黄红土	0.264
泥质暗黄棕壤	0.216	泥质黄色赤黄壤	0.265
灰岩赤红壤	0.173	泥质山原红壤	0.267
泥质赤红壤	0.186	砂质山原红壤	0.370
暗赤红壤	0.174	暗沙泥田	0.329
紫赤红壤	0.174		

1.3.4 地形因子(L、S)的计算 坡长和坡度是研究土壤侵蚀问题中必须要考虑的重要地形因子,二者反映了地形地貌对土壤侵蚀的影响。目前,国内外对于 L 和 S 的计算方法基本上都是借助于 GIS 技术,以 DEM 为基础,采用不同的算法来提取坡度和坡长,然后根据不同地区的实际情况,计算各地区的地形因子<sup>[27]</sup>。本研究采用江忠善等<sup>[28]</sup>提出的 L 值的计算方法,计算公式如下。

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \tag{3}$$

式中:λ 为栅格单元投影长度。m 为坡长效应指数,当坡度 < 1% 时,m = 0.2;当坡度介于 1% ~ 3% 时,m = 0.3;当坡度介于 3% ~ 5% 时,m = 0.4;当坡度 > 5% 时,m = 0.5<sup>[29]</sup>。在 ArcGIS 软件中,m

值采用 Flow direction 赋值得到。

对于 S 值,采用 Liu 等<sup>[30]</sup>的坡度公式。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.61\sin\theta - 0.06 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中:θ 为坡度值。

1.3.5 植被覆盖因子(C)的计算 C 是 USLE 方程中最重要的参数,表征所有植被特征,如植被类型、作物种植顺序、生产力水平、生长季长短、栽培措施、作物残余物管理等因素对土壤侵蚀的综合影响<sup>[31]</sup>,具体是指在特定条件下种植农作物土地上的土壤流失量与休闲土地上相应的土壤流失量之比。作物覆盖、轮作顺序及管理措施等的综合作用决定了 C 值。C 值一般为 0~1,当地面完全裸露时,C 值为 1.0;当地面植被覆盖度很好时,C 值可取 0.001。研究表明,植被覆盖度与水土流失存在一定的定量关系<sup>[32]</sup>。本研究中 C 值基于归一化植被指数(NDVI)计算得到<sup>[21]</sup>,而 NDVI 的计算参照郭兵等<sup>[33]</sup>的方法,植被覆盖度( $f_g$ )的计算根据像元二分模型<sup>[34-35]</sup>。

$$C = \begin{cases} 1 & f_g = 0 \\ 0.6508 - 0.3436\lg f_g & 0 < f_g \leq 78.3\% \\ 0 & f_g > 78.3\% \end{cases} \quad (5)$$

表 2 不同土地利用类型 P 值

项目	旱地 1	旱地 2	水田	灌木林	林地	草地	建设用地	水域	橡胶林	桉树林	茶园
P	0.55	0.75	0.03	1	1	1	0	0	0.6	0.8	0.35

注:旱地 1 表示坡度小于 15°的旱地,旱地 2 表示坡度大于 15°的旱地。

1.4 土壤侵蚀空间分布图的建立

在 ArcGIS 10.1 中将收集的不同因子的数据,按照 1.3 中相应的计算方法生成相应的 30 m×30 m 的栅格图。降雨侵蚀图通过克里格插值法(Kriging)生成;土壤类型图的生成是通过在 ArcGIS 中建立数据库,生成相应的矢量图,并在矢量图属性表中赋值,然后转为栅格图;地形图是分别按照公式计算出 L 和 S 并相乘得到;植被覆盖图是基于 NDVI 在 ArcGIS 中计算生成;水土保持措施因子图是基于孟连县的土地利用类型数据,通过 ArcGIS 软件赋值并生成栅格图。最后运用栅格计算器将以上 5 个图进行栅格叠加运算,得到孟连县土壤侵蚀强度空间分布图。

2 结果与分析

2.1 孟连县土壤侵蚀的时间变化特征

由表 3 可知,2000 年孟连县各土壤侵蚀等级的

$$f_g = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_g - NDVI_0) \quad (6)$$

$$NDVI = (band4 - band3) / (band4 + band3) \quad (7)$$

式中,NDVI<sub>0</sub> 为裸土或无植被像元的 NDVI 值,NDVI<sub>g</sub> 为纯植被像元的 NDVI 值,band3 为远红外波段,band4 为近红外波段。

1.3.6 水土保持措施因子(P)的计算 P 具体指特定水土保持措施下的土壤流失量与相应未实施该措施的顺坡种植时的土壤流失量之比<sup>[36]</sup>,反映了水土保持措施对于坡地土壤流失量的控制,实际中,水土保持措施通过降低地表径流速率等作用减轻土壤侵蚀<sup>[25]</sup>。由其定义可知,P 值越小,表示水土保持措施对土壤侵蚀的抑制作用越明显;P 值等于 0,说明根本不发生土壤侵蚀;P 值等于 1,表明抑制作用完全失效。孟连县为山区,旱地大部分是坡耕地,当坡度小于 15°时,P 值赋值为 0.55;大于 15°时,P 值赋值为 0.75<sup>[33]</sup>。其他土地利用类型的 P 值结合孟连县当地的土地利用现状,并参考前人<sup>[37-39]</sup>的研究结果得出。如橡胶林有部分区域为梯地(梯地的宽度较小),有部分区域为坡地,因此其 P 值在梯地与坡地之间赋值,为 0.6;桉树林种植后很少采取保护措施,其 P 值赋值为 0.8;荒草地和其他林地都赋值为 1(表 2)。

土壤侵蚀总量为 1.96×10<sup>7</sup> t/a,基于 Zonal Statistics(分区统计)功能计算得出县域土壤侵蚀模数为 104.25 t/(hm<sup>2</sup>·a),属于极强度侵蚀;2010 年县域土壤侵蚀总量为 1.21×10<sup>7</sup> t/a,县域土壤侵蚀模数为 64.11 t/(hm<sup>2</sup>·a),属于强度侵蚀。从各侵蚀等级上看,2000 年孟连县极强度侵蚀和剧烈侵蚀面积均较大;到 2010 年,极强度侵蚀面积依然较大,但剧烈侵蚀明显减少,孟连县土壤总体属于强度侵蚀,说明土壤侵蚀在一定程度上得到了缓解。从整体上看,2000—2010 年研究区中度及以上(中度侵蚀及其以上的地区为严重侵蚀地区)总侵蚀面积降低,尤其是极强度侵蚀和剧烈侵蚀面积明显下降;相应地,土壤侵蚀总量也有明显下降,从 1.96×10<sup>7</sup> t/a 降至 1.21×10<sup>7</sup> t/a,孟连县土壤从极强度侵蚀降至强度侵蚀,说明这 10 a 间土壤侵蚀情况得到了一定的缓解,这可能归因于退耕还林、大面积种植人工林、“坡改梯”等措施的实施。

表 3 2000、2010 年孟连县不同侵蚀等级土壤的侵蚀情况

土壤侵蚀等级	2000 年			2010 年		
	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀面 积/hm <sup>2</sup>	侵蚀量/(× 10 <sup>4</sup> t/a)	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀面 积/hm <sup>2</sup>	侵蚀量/(× 10 <sup>4</sup> t/a)
微度侵蚀	1.18	16 320.24	1.93	1.24	19 638.99	2.44
轻度侵蚀	15.24	18 963.99	28.90	15.23	33 425.01	50.91
中度侵蚀	37.67	27 091.35	102.05	37.23	39 739.68	147.95
强度侵蚀	64.60	31 512.33	203.57	64.08	36 844.29	236.10
极强度侵蚀	111.23	49 665.42	552.43	108.58	43 746.03	474.99
剧烈侵蚀	239.98	44 755.38	1 074.04	197.53	14 915.97	294.64

2.2 孟连县土壤侵蚀的空间变化特征

由图 1 和表 4 比较得出,2000 年孟连县土壤侵蚀较为严重,尤其是西部和南部的局部地区,侵蚀模数从大到小为公信乡、富岩乡、勐马镇、芒信镇、娜允镇、景信乡;到了 2010 年,孟连县土壤侵蚀情况整体减轻,但仍以西部较严重,侵蚀模数从大到小为公信乡、芒信镇、富岩乡、勐马镇、景信乡、娜允镇。从各乡镇

土壤侵蚀量来看,2000、2010 年勐马镇的土壤侵蚀量均最大,其次为公信乡、芒信镇;而景信乡土壤侵蚀量均最小。对比勐马镇、芒信镇、公信乡、娜允镇、富岩乡、景信乡 2000、2010 年中度及其以上侵蚀面积所占比例发现,公信乡中度及其以上土壤侵蚀面积所占比例最大,分别为 88.03%、82.53%,其次为芒信镇、富岩乡等;最小的是景信乡,分别为 71.92%、63.60%。

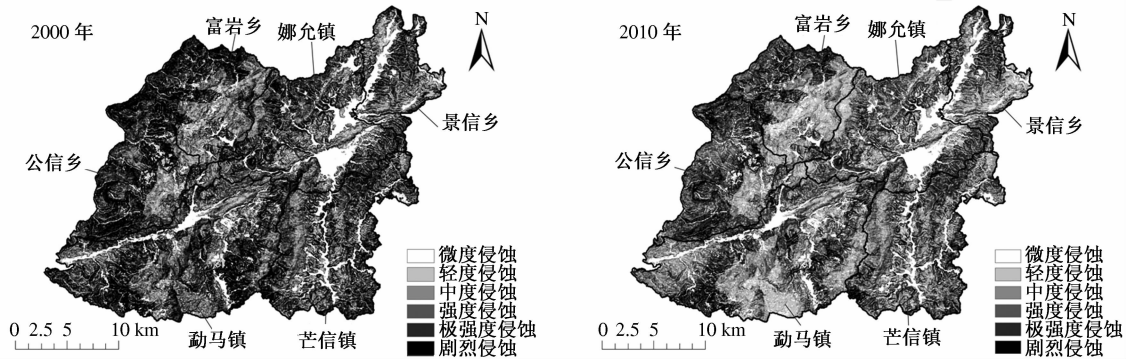


图 1 2000 年和 2010 年孟连县土壤侵蚀分布情况

表 4 孟连县不同乡(镇)的土壤侵蚀情况

乡(镇)	2000 年			2010 年		
	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀量/ (×10 <sup>4</sup> t/a)	中度及其以上侵蚀 面积所占比例/%	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀量/ (×10 <sup>4</sup> t/a)	中度及其以上侵蚀 面积所占比例/%
勐马镇	108.75	560.88	82.97	60.42	311.62	70.07
芒信镇	100.57	345.92	83.18	66.31	228.08	76.36
公信乡	135.26	362.16	88.03	83.27	222.96	82.53
娜允镇	84.23	302.30	75.05	56.20	201.70	67.28
富岩乡	113.62	273.14	83.61	64.33	154.65	69.96
景信乡	77.96	129.99	71.92	57.08	95.18	63.60

2.3 不同环境背景下的土壤侵蚀变化特征

2.3.1 不同降雨强度下土壤侵蚀变化特征 从图 2 可以看出,2010 年,在 R 值小于 600 时,孟连县各侵蚀等级土壤面积不明显;R 值在 650~800 时,所有侵蚀等级土壤面积总体呈现增加趋势,其中以轻度、中度、强度、极强度等级的土壤侵蚀面积的变化较为明显。整体而言,土壤侵蚀面积随着降雨强度的增加而增加,但是也存在临界值,即 R>800 后,各侵蚀等级土壤面积整体呈快速下降的趋势,这可能与降雨强度、降雨量、降雨历时等降雨参数

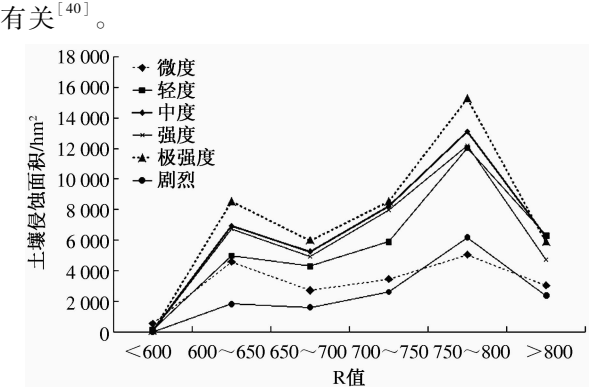


图 2 不同降雨强度下土壤侵蚀分布

2.3.2 不同坡度下土壤侵蚀变化特征 由表 5 可以看出,2010 年,孟连县土壤侵蚀强度与坡度大小的相关性较明显,土壤侵蚀强度随着土壤坡度的增加而增加。坡度在 0°~5°时,属于微度侵蚀等级;在 5°~8°时,属于轻度侵蚀等级;坡度在 8°~15°时,属于中度侵蚀等级;坡度在 15°~25°和 25°~35°时,均属于极强度侵蚀等级;坡度在 35°以上时,属于剧烈侵蚀等级。另外,坡度>8°后,土壤侵蚀面积和土壤侵蚀量均随着坡度的增加先增加后降低,土壤侵蚀量最大的是 15°~25°坡度区,其次是 25°~35°坡度区。总的来讲,在其他条件不变的情况下,孟连县土壤坡度在 8°~35°时,土壤侵蚀最明显,该区域土壤侵蚀总量占县域土壤侵蚀总量的 92.12%。所以,需要对 8°~35°坡度区间的土壤侵蚀采取必要的措施加以治理。

表 5 孟连县不同坡度下的土壤侵蚀程度

坡度	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀面积 /hm <sup>2</sup>	土壤侵蚀量/ (×10 <sup>4</sup> t/a)
<5°	3.77	20 775.20	7.83
5°~8°	16.93	13 210.36	22.37
8°~15°	41.87	52 176.13	218.46
15°~25°	82.00	75 109.47	615.90
25°~35°	117.41	23 870.25	280.26
>35°	161.32	4 038.44	65.15

2.3.3 不同土壤类型下土壤侵蚀变化特征 由表 6 可知,2010 年,孟连县红壤的侵蚀强度最大,属于极强度侵蚀,但是由于其分布面积不是很大,所以总侵蚀量并不是最大;赤红壤的侵蚀强度仅次于红壤,属于强度侵蚀,其土壤侵蚀量和侵蚀面积最大;砖红壤的侵蚀强度也较大,也属于强度侵蚀,但土壤侵蚀面积和侵蚀量均较小;其他土壤类型的侵蚀强度和侵蚀量相对较小,属于中度侵蚀。上述结果说明,研究区赤红壤、红壤、砖红壤侵蚀相对严重;不同土壤类型之间的耐侵蚀程度不同;另一方面,土壤侵蚀强度可能与土壤本身的理化性质、土壤结构等有关,这有待于进一步研究。

表 6 孟连县不同土壤类型下的土壤侵蚀程度

土壤类型	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀量/ (×10 <sup>4</sup> t/a)	土壤侵蚀面积 /hm <sup>2</sup>
赤红壤	70.21	863.41	122 975.53
红壤	80.97	167.62	20 701.98
黄壤	27.42	50.00	18 235.55
黄棕壤	33.59	31.80	9 466.07
水稻土	43.95	36.90	8 395.46
砖红壤	67.00	63.18	9 429.67

2.3.4 不同土地利用类型下土壤侵蚀变化特征 由表 7 可知,孟连县不同土地利用类型之间土壤侵蚀

强度差异较大,土壤侵蚀最严重的是旱地 2(坡度大于 15°的旱地),土壤侵蚀模数为 109.63 t/(hm<sup>2</sup>·a),属于极强度侵蚀,这可能是由于孟连县的耕地大部分是坡耕地,即耕地主要分散在坡度小于 25°的山区和半山区,坝区耕地较少,大部分耕地未采取任何防护措施,加之不合理的土地开垦和利用,致使大面积的坡耕地成为土壤侵蚀的主要发源地。其次是荒草地和灌木林,土壤侵蚀模数分别为 82.69、78.14 t/(hm<sup>2</sup>·a),分别属于极强度侵蚀、强度侵蚀。荒草地侵蚀较严重的原因是原有的草地植被覆盖率低,新增的草地大多数来源于耕地退耕和一些林地的退化,同样未采取任何保护措施,加上降雨、地形、土壤等因素的影响,侵蚀严重;孟连县地区的灌木林结构较为简单,且分布坡度主要集中在 8°~35°,植被覆盖度较低,地面裸露程度大,对降雨的截留效果较差,致使土壤侵蚀严重。再次是林地,土壤侵蚀模数为 72.48 t/(hm<sup>2</sup>·a),属于强度侵蚀。一方面原因是林地分布广阔;另一方面,流域内林地目前以针叶林居多,其林冠层对降雨截留的作用较弱<sup>[3,41]</sup>,并且林地主要分布在坡度为 15°~35°的较陡的区域,加上强降雨、土质疏松等原因,使坡陡地区容易快速形成地表径流,易诱发洪水等地质灾害,从而加大这些区域的土壤流失量。此外,橡胶林、桉树林土壤侵蚀强度也较大,土壤侵蚀模数分别为 64.09、49.02 t/(hm<sup>2</sup>·a),分别属于强度侵蚀和中度侵蚀,这是因为他们大部分为人工引种,且生长初期水土保持功能低下,尤其是橡胶林。水田和建设用地的侵蚀量均较小,属于微度侵蚀。综上,孟连县坡度大于 15°的旱地土壤侵蚀最严重。

表 7 孟连县不同用地类型下的土壤侵蚀程度

土地利用类型	土壤侵蚀模数/ [t/(hm <sup>2</sup> ·a)]	土壤侵蚀量/ (×10 <sup>4</sup> t/a)
桉树林	49.02	21.66
茶园	28.25	16.05
灌木林	78.14	35.53
荒草地	82.69	17.85
建设用地	0.91	0.06
水田	3.53	3.26
橡胶林	64.09	128.44
旱地 1(坡度小于 15°)	29.60	66.24
旱地 2(坡度大于 15°)	109.63	173.19
林地	72.48	749.17

3 结论与讨论

本研究采用的 USLE 模型作为目前应用最为广泛的坡面模型,在区域土壤侵蚀评价中具有十分重要的作用,通过 USLE 模型估算了研究区的年均土

壤侵蚀量。事实证明,该方程所需的参数较易获得,操作简便,结果清晰。本研究结果表明,2000 年和 2010 年孟连县的土壤侵蚀严重,土壤侵蚀模数分别为  $104.25 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  和  $64.11 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,分属极强度侵蚀和强度侵蚀。孟连县极强度和剧烈侵蚀面积正逐步减少,微度、轻度、中度和强度侵蚀面积在增加,土壤侵蚀仍然是威胁当地土地生态安全的重要因素。从空间分布来看,孟连县 2000 年和 2010 年的土壤侵蚀格局基本是东部相对较轻,西部相对严重,均以公信乡土壤侵蚀最严重,相对较轻的是景信乡、娜允镇。所以,结合不同区域的土壤侵蚀情况,当地政府要积极采取相应措施对土地利用结构作出合适的调整和优化,如退耕还林、退耕还草,重视对人工林和荒草地的管理,努力协调各种用地之间的关系;加强农田水利工程建设,实施雨水集蓄利用技术;积极采取“坡改梯”的措施等。

在一定降水范围( $800 \geq R \geq 600$ )内,土壤侵蚀强度总体与降水强度表现为正相关;当  $R > 800$  时,土壤侵蚀强度与降水强度表现为负相关。土壤侵蚀强度随着坡度的增加而增大,侵蚀量主要集中于  $8^\circ \sim 35^\circ$  坡度区域。赤红壤、红壤、砖红壤的侵蚀相对严重,黄壤最轻。坡度大于  $15^\circ$  的旱地土壤侵蚀最严重,其次为荒草地和灌木林,水田和建设用地土壤侵蚀较轻。

徐清艳等<sup>[26]</sup>对云南新平大红山铁矿区进行的土壤侵蚀量的研究以及傅世锋等<sup>[42]</sup>对东圳库区土壤侵蚀量的预测研究表明,微度侵蚀主要分布在  $0 \sim 5^\circ$  的缓坡上;轻度侵蚀主要分布在  $8^\circ \sim 15^\circ$  的坡上;中度侵蚀比较普遍,各种坡度都有;极强度侵蚀主要分布在  $25^\circ \sim 35^\circ$  的区域;剧烈侵蚀主要分布在  $> 35^\circ$  的陡坡上。本研究结果表明,孟连县土壤侵蚀强度随着坡度的增加而增大,侵蚀主要集中于  $8^\circ \sim 35^\circ$  坡度区域。另外,姚华荣等<sup>[43]</sup>对澜沧江流域云南段土壤侵蚀的研究表明,在一定范围内,土壤侵蚀程度基本上随降雨量的增加而增加;当降雨量增加到一定程度,土壤侵蚀程度反而较小,原因是前期大雨冲刷侵蚀,带走了地表的疏松物质,这与本研究结果相似。

对孟连县不同土地利用类型土壤的侵蚀情况进行分析发现,坡度大于  $15^\circ$  的旱地的侵蚀情况最严重,这与一些学者的研究成果基本一致<sup>[44-46]</sup>。一般认为,土壤流失随着植被覆盖的增加而降低,土壤侵蚀强度和植被覆盖度往往表现为线性关系或指数关系<sup>[47]</sup>。然而,在较低植被覆盖或植被稀疏的情况下,土壤侵蚀强度和植被覆盖度的相关性并不高,甚

至出现土壤侵蚀强度随着植被覆盖度的增加而增加的现象<sup>[48]</sup>。对于孟连县,首先是旱地作为人们生产生活的用地,受人类活动干扰强度大,未采取有效的保护措施,加之旱地多为坡耕地,坡度变化大,即使种植密度大,作物生长良好,土壤侵蚀依然严重。其次是荒草地,其土壤侵蚀强度仅次于坡度大于  $15^\circ$  的旱地,其植被覆盖度低。从经验上讲,高质量草地由于草类植物降低降雨对地面的击打动能和根系对土壤的固结作用,因而土壤侵蚀强度不是很大。但由于过度放牧和开垦田地等造成高质量草场的不断退化,部分草场已失去了水土保持应有的功效,导致严重的土壤侵蚀。所以,对于草地特别是覆盖度低和退耕初期草地的土壤侵蚀监管有待加强<sup>[44]</sup>。再次是灌木林,根据一些学者的研究,云南省一些地区的灌木林地以暖温性灌丛为主,结构简单,植被覆盖度低,且分布于坡度较陡的区域,植被对土壤的改造较弱<sup>[3]</sup>,对比本研究区域,情况类似。孟连县的林地大都分布于坡度为  $15^\circ \sim 35^\circ$  的区域,陡坡地植被一旦遭到破坏,很容易造成水土流失、滑坡、泥石流等地质灾害,加之部分地区人工采伐严重、地表植被稀疏、强降雨等原因,导致林地的土壤侵蚀也相对严重。而耕地中,旱地土壤侵蚀发生率高而水田发生率低,应区别对待;建设用地建设时土壤侵蚀强度大,当建设完成后,地表被凝固的水泥或沥青等覆盖,不易发生土壤侵蚀<sup>[44]</sup>。桉树人工林引种后,孟连县原有的植被类型发生了变化。有关研究表明,大面积种植桉树林一方面消耗较大的水分,在一定程度上具有涵养水源和削减洪水的作用<sup>[49]</sup>;另一方面,种植区的土壤容重增加,土壤紧实度增加,致使土壤通水透气性变差,结构性能下降<sup>[50-51]</sup>。因此,必须坚持科学引种、合理经营人工林。

#### 参考文献:

- [1] 李智广,曹炜,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.
- [2] 刘震.从我国水土流失现状看水土保持生态建设战略布局及主要任务[J].中国水利,2002(7):31-33.
- [3] 董磊,彭明春,王崇云,等.基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J].水土保持研究,2012,19(2):11-14,18.
- [4] 刘娜,王克林,张伟,等.土壤侵蚀及其评价、检验方法研究进展[J].中国农学通报,2011,27(18):1-6.
- [5] Singh R, Panigrahy N, Philip G. Modified rainfall simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies [J]. Agricultural Water Management, 1999, 41(3): 167-175.

- [6] 陈兴芳. 基于 USLE 模型的青海湖流域土壤侵蚀现状评价[D]. 西宁:青海师范大学,2012:5.
- [7] 耿婵. GIS 技术支持下的小流域土壤侵蚀量研究[D]. 西安:西安科技大学,2011:9-11.
- [8] 王小杰,李跃明. 深圳市城市土壤侵蚀预测模型的初步建立[J]. 中国农村水利水电,2009,51(9):71-74.
- [9] 高天雷,武萍,尹学明. 土壤侵蚀模型研究进展[J]. 四川林业科技,2014,35(4):42-44.
- [10] 唐政洪,蔡强国,许峰. 流域侵蚀产沙的尺度变异规律研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(1):56-61.
- [11] Boyle J F,Plater A J,Mayers C,*et al.* Land use, soil erosion, and sediment yield at Pinto Lake, California; Comparison of a simplified USLE model with the lake sediment record[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 45(2):199-212.
- [12] 洪华生,杨远,黄金良. 基于 GIS 和 USLE 的下庄小流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2005,44(5):675-679.
- [13] 邹金浪,谢花林,杨子生,等. 基于 USLE 的土壤侵蚀敏感性评价及其空间自相关分析——以江西省兴国县为例[J]. 农业现代化研究,2011,32(6):761-765.
- [14] 柳长顺,齐实,史明昌. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展[J]. 水土保持学报,2001,15(5):10-13,17.
- [15] 邱扬,傅伯杰,王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系[J]. 水土保持学报,2002,16(1):108-111.
- [16] 邱扬,傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异[J]. 生态学报,2004,24(2):330-337.
- [17] 周湘山,孙保平,李锦荣. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀定量分析研究——以四川省洪雅县为例[J]. 水土保持研究,2011,18(4):5-10,15.
- [18] Wang X D,Zhong X H,Fan J R. Assessment and spatial distribution of sensitivity of soil erosion in Tibet[J]. *Journal of Geographical Sciences*,2004,14(1):41-46.
- [19] 董婷婷,张增祥,左利君. 基于 GIS 和 RS 的辽西地区土壤侵蚀的定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(4):48-52.
- [20] 许月卿,邵晓梅. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀量计算——以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报,2006,28(4):67-71.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:水利电力出版社,2008.
- [23] 梁伟. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀控制效果研究——以陕西省吴旗县柴沟流域为例[D]. 北京:北京林业大学,2005:6.
- [24] 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(增刊):1-9.
- [25] 彭建,李丹丹,张玉清. 基于 GIS 和 USLE 的滇西北山区土壤侵蚀空间特征分析——以云南省丽江县为例[J]. 山地学报,2007,25(5):548-556.
- [26] 徐清艳,周跃. 基于 GIS 和 USLE 的土壤侵蚀预测研究——以云南新平大红山铁矿为例[J]. 水土保持研究,2009,16(4):72-75.
- [27] 马永力. 基于 3S 技术和 USLE 模型的土壤侵蚀研究[D]. 郑州:郑州大学,2010:24-25.
- [28] 江忠善,郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. 水土保持学报,2004,18(1):66-69.
- [29] 蔡永明,张科利,李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报,2003,40(4):511-517.
- [30] Liu B Y,Nearing M A,Risse L M. Slop gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*,1994,37(6):1835-1840.
- [31] Wischmeier W H,Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[M]//*Agriculture handbook*. Washington D C: United States Department of Argiculture,1978.
- [32] 赵世民,杨常亮,徐玲. 基于 USLE 和 GIS 的阳宗海流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 环境科学导刊,2007,26(4):1-4.
- [33] 郭兵,陶和平,刘斌涛,等. 基于 GIS 和 USLE 的汶川地震后理县土壤侵蚀特征及分析[J]. 农业工程学报,2012,28(14):118-126.
- [34] 马超飞,马建文,布和敖斯尔. USLE 模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J]. 水土保持通报,2001,21(4):6-9.
- [35] 刘玉安,黄波,程涛,等. 基于像元二分模型的淮河上游植被覆盖度遥感研究[J]. 水土保持通报,2012,32(1):93-97.
- [36] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
- [37] 王文娟,张树文,李颖,等. 基于 GIS 和 USLE 的三江平原土壤侵蚀定量评价[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(9):112-117.
- [38] 冯磊,孙保平,李锦荣,等. GIS 方法和 USLE 模型在退耕还林区土壤侵蚀动态变化评价中的运用——以甘肃定西市安定区为例[J]. 湖南农业科学,2011(11):82-89.
- [39] 赵磊,袁国林,张琰,等. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [40] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等. 中国降雨侵蚀力 R 指标研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(4):1-5.
- [41] 杨树华,贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制[M]. 昆明:云南科技出版社,1998.



产量,这是因为追施氮肥增加了夏玉米的吸氮量,促进了夏玉米对氮素的吸收和同化,提高了氮肥利用效率<sup>[16]</sup>。总体上,肥料增效剂与氮肥的最佳配施方式及施用量为:基施氮 135 kg/hm<sup>2</sup> + 伴能 2 250 mL/hm<sup>2</sup>,追施氮 135 kg/hm<sup>2</sup>。在此条件下夏玉米实测产量最高,为 10 838. 70 kg/hm<sup>2</sup>;理论产量最高,为11 223. 90 kg/hm<sup>2</sup>。

参考文献:

[1] 郭庆法,王庆成,汪黎明,等. 中国玉米栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2004:1-5.

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2014 [DB/OL]. [2015-04-28]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexce.htm>.

[3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000,9(1):1-6.

[4] 黄开健,杨华铨,谭华,等. 秋玉米高产栽培技术的最佳密度和施肥量研究[J]. 玉米科学,2001,9(1): 57-59.

[5] 吴建明,陆国盈,梁和. 肥料与密度对高油玉米农艺性状及产量的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(2): 175-177,207.

[6] 李万星,刘永忠,曹晋军,等. 肥料与密度对玉米农艺性状和产量的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(15): 194-198.

[7] Baligar V C,Fageria N K,He Z L. Nutrient use efficiency in plants[J]. Commun Soil Sci Plant Anal,2001,31(7):

921-950.

[8] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.

[9] 王空军,张吉旺,郭玉秋,等. 我国北方玉米品种个体产量潜力与氮利用效率研究[J]. 应用生态学报, 2005,16(5):879-884.

[10] Chun L,Mi G H,Li J S,*et al.* Genetic analysis of maize root characteristics in response to low nitrogen stress [J]. Plant Soil,2005,276(1/2):369-382.

[11] Tian Q Y,Chen F J,Zhang F S,*et al.* Genotypic difference in nitrogen acquisition ability in maize plants is related to the coordination of leaf and root growth [J]. Journal of Plant Nutrition,2006,29(2):317-330.

[12] 谭巍巍,王阳,李永祥,等. 不同环境下多个玉米穗部性状的 QTL 分析[J]. 中国农业科学,2011,44(2): 233-244.

[13] 杨升辉,张延和,刘晶,等. 超高产栽培氮肥运筹对春玉米穗部性状及产量的影响[J]. 作物杂志,2011 (6):38-41.

[14] 杨利华,张丽华,张全国,等. 种植样式对高密度夏玉米产量和株高整齐度的影响[J]. 玉米科学,2006,14 (6):122-124.

[15] 腾树川. 玉米施用氮磷钾肥与产量形成的关系试验浅析[J]. 耕作与栽培,2002(2):40-41.

[16] 赵斌,董树亭,张吉旺,等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报,2010,36(10): 1760-1768.

\*\*\*\*\*

(上接第 52 页)

[42] 傅世锋,查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J]. 地球信息科学,2008,10(3): 390-395.

[43] 姚华荣,杨志峰,崔保山. 云南省澜沧江流域的土壤侵蚀及其环境背景[J]. 水土保持通报,2005,25(4): 5-14.

[44] 高杨,吕宁,薛重生,等. 不同区域土地利用与土壤侵蚀空间关系研究[J]. 中国水土保持,2006(11): 21-23.

[45] 刘权,王忠静. GIS 支持下辽河中下游流域不同土地利用的土壤侵蚀变化分析[J]. 水土保持学报,2004, 18(4):105-107.

[46] 姚华荣,崔保山. 澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响[J]. 环境科学学报,2006,26 (8):1362-1371.

[47] Puigdefábregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2005,30:133-147.

[48] Boer M, Puigdefábregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: A simulation study [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2005,30(2): 149-167.

[49] 赵筱青,和春兰,许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. 生态环境学报,2012,21 (11):1810-1816.

[50] 赵筱青,和春兰,易琦. 大面积桉树引种区土壤水分及水源涵养性能研究[J]. 水土保持学报,2012,26 (3):205-210.

[51] 王小强. 不同林龄巨桉人工林土壤理化性质动态研究[D]. 雅安:四川农业大学,2009.