

文章编号:1003-7853(2019)06-0064-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504601);国家自然科学基金项目(31971488)

DOI:10.16202/j.cnki.tnrs.2019.06.017

## 延安麻塔流域植被 对土壤侵蚀的控制效率研究

李国庆<sup>1,2</sup>,温仲明<sup>1,2</sup>,杜盛<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业  
国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 定量刻画植被对土壤侵蚀的控制效率对区域水土保持评估具有重要的意义。目前学者多采用土壤保持量指标来衡量植被对土壤侵蚀控制效率,然而该指标强烈的受到区域潜在土壤侵蚀量影响,从而导致低估或高估植被对土壤侵蚀控制效率。本研究在土壤保持量的基础上,构建了土壤侵蚀控制指数,并将该指数应用于延安麻塔流域的土壤保持功能评估中。结果表明:(1)土壤侵蚀控制指数比土壤保持量在区域土壤保持功能评估中更能有效的在流域尺度上侦测植被对潜在土壤侵蚀控制效率;(2)麻塔流域植被总体上具有较高的土壤侵蚀控制指数(均值为0.92);(3)土壤侵蚀控制指数主要受到植被和坡度单独作用的影响,两者能够解释侵蚀控制指数84.11%的变异来源;(4)由于麻塔流域潜在土壤侵蚀量较大( $114100 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),导致该区仍然具有较高的土壤侵蚀模数( $8200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),因此采取工程措施治理水土流失必须进一步加强。

**关键词:** 土壤侵蚀控制指数;控制效率;土壤保持量;植被结构  
中图分类号:P9;S156 文献标识码:A

### Study on the control efficiency of vegetation on soil erosion in mata watershed of Yanan City

LI Guo-qing<sup>1,2</sup> et al

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Shanxi Yangling 712100, China; 2. Ministry of water resources, Chinese academy of sciences, Shanxi Yangling 712100, China )

**Abstract:** Quantitative characterization the control efficiency of regional vegetation structure to potential soil erosion is of great significance for regional assessment of soil and water conservation. At present, most scholars use soil conservation amount (SCA) to measure the control efficiency of vegetation on soil erosion. However, this indicator is strongly affected by potential regional soil erosion, which leads to underestimation or overestimation of the control efficiency of vegetation on soil erosion. Based on the concept of SCA, a soil erosion control index (SECI) was constructed in this study. Then, it was applied to the assessment of soil conservation function in mata watershed of Yanan city. The results show that: (1) SECI is more effective in detecting erosion control efficiency of vegetation than that of SCA in regional soil

conservation assessment at watershed scale, because the SECI is a relative proportion of erosion control and is not affected by the regional differences of potential soil erosion; (2) on the whole, the vegetation in mata watershed has a high soil erosion control index, with an average value of 0.92 in mata watershed; (3) SECI is mainly affected by vegetation and slope, which can explain 84.11% of the variation sources of erosion control index; (4) because of large amount value of potential soil erosion in this area ( $114100 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), it still has a higher value of soil erosion modulus ( $8200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) in mata watershed. Therefore, engineering strategies for reducing erosion modulus should to be further strengthened in the region.

**Key words:** Soil erosion control index; Control efficiency; Soil conservation amount; Vegetation structure

土壤侵蚀严重地威胁着土地生产力,引起生态环境恶化,是世界上主要自然灾害之一<sup>[1-3]</sup>。长期以来,学者围绕土壤侵蚀开展从基础理论到应用实践的研究。在理论上,提出了土壤流失方程<sup>[4,5]</sup>和泥沙输移比<sup>[6]</sup>等;在实践上,探索植被变化和土地利用变化对土壤侵蚀的阻控效益<sup>[7,8]</sup>。一般认为,区域植被结构的变化可引起流域侵蚀产沙程度的加剧或减弱<sup>[9-11]</sup>。

过去很多研究基于土壤保持量指标来评估流域植被结构对土壤侵蚀控制的效率<sup>[9-11]</sup>,土壤保持量在小尺度实验中作为评估指标是合适的,因为小尺度上的背景环境条件相对一致(如坡度、坡长、降雨量等);但在流域和区域尺度的评估中,使用土壤保持量可能会高估或低估植被对土壤侵蚀控制效率,这取决于潜在土壤侵蚀量的大小<sup>[12-14]</sup>。基于此,本文提出土壤侵蚀控制指数(详见1.2.1小节),能够克服使用土壤保持量指标带来的不确定性。

延安周边地区从上世纪70年代以来的水土保持工程以及1999年以来的退耕还林工程,使得区域植被结构变化迅速<sup>[15]</sup>,植被结构的变化必然在空间上导致区域土壤侵蚀强度在时空格局上发生了变化。如何定量的刻画当前植被结构对区域土壤侵蚀的控制效率是尚未完全解决的科学问题。本文试图构建土壤侵蚀控制指数,并将土壤侵蚀控制指数应用于延安宝塔区南部的麻塔流域,探索植被结构对潜在土壤侵蚀量的侵蚀控制效率及其空间分布特征,为该地区的水土保持工程和植被结构调整提供基础数据和理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域概况

麻塔流域位于陕北延安宝塔区的南部( $109.5268^\circ \text{ N}, 36.4695^\circ \text{ E}$ ,如图1所示),流域面积 $2.44 \text{ km}^2$ ,海拔1185~1379m,属于干旱半干旱气候,夏季炎热,冬季寒冷干冷。通过1960~2000年全球气候数据插值结果显示,该地区年均温 $8.8^\circ \text{ C}$ ,多年平均降雨量523mm,6~9月份降雨量占据全年降雨量的70%以上。流域内土壤类型为黄绵土,属于典型的黄土丘陵区。麻塔流域2012年共有居民337人,苹果产业是该

地区农民的主要经济来源。根据 Landsat8 遥感影像解译 2016 年该区 6 类植被(土地)类型(图 1):森林、灌木、草地、果园、农田和其他(道路和房屋),分别占据流域面积的 9.2%、11.9%、21.2%、49.8%、3.4%和 4.5%。

## 1.2 研究的方法

**1.2.1 土壤侵蚀控制指数。**本研究中定义土壤侵蚀控制指数为土壤保持量与潜在土壤侵蚀量的比率。土壤保持量为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值。潜在土壤侵蚀量是一种理论值,是指在无植被覆盖的裸地上土壤侵蚀量。实际土壤侵蚀量是指有植被覆盖时的土壤侵蚀量(考虑人工植被的水土保持措施因子)。因此土壤侵蚀控制指数反映的是植被结构(包括人工植被)对潜在土壤侵蚀量的控制能力。由于区域土壤保持评估都是在栅格图层上进行的,定义每一个栅格计算公式如下:

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i \quad (1)$$

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (2)$$

$$SCA_i = RKLS_i - USLE_i = RKLS_i(1 - C_i \times P_i) \quad (3)$$

$$SECI_i = SCA_i / RKLS_i = 1 - C_i \times P_i \quad (4)$$

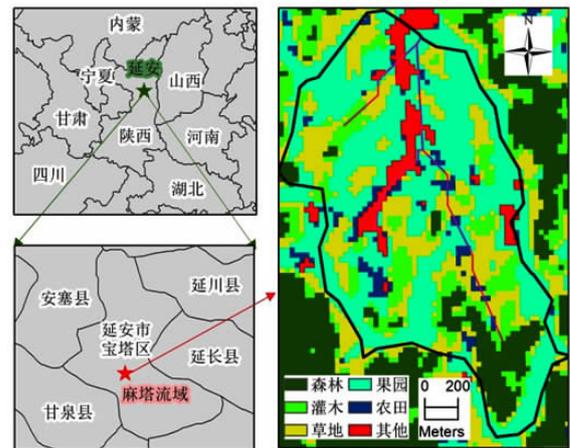
公式中  $RKLS_i$ 、 $USLE_i$ 、 $SCA_i$  和  $SECI_i$  分别表示  $i$  栅格的潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量、土壤保持量和土壤侵蚀控制指数。 $R_i$  表示  $i$  栅格的降雨侵蚀力因子,  $K_i$  表示  $i$  栅格的土壤可蚀性因子,  $LS_i$  表示  $i$  栅格的坡度坡长因子,  $C_i$  表示  $i$  栅格的植被覆盖度因子,  $P_i$  表示  $i$  栅格的水土保持措施因子。

从上述公式(3)(4)可以看出,土壤保持量受到潜在土壤侵蚀量的影响,而土壤侵蚀控制指数是不受到潜在土壤侵蚀量的影响。本研究定义区域土壤侵蚀控制效率用区域内所有栅格的均值表示:潜在土壤侵蚀量 [ $RKLS = \text{mean}(\sum RKLS_i)$ ]、实际土壤侵蚀量 [ $USLE = \text{mean}(\sum USLE_i)$ ]、土壤保持量 [ $SCA = \text{mean}(\sum SCA_i)$ ] 和土壤侵蚀控制指数 [ $SECI = \text{mean}(\sum SECI_i)$ ] ,其中  $i$  表示区域栅格数量。

**1.2.2 潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量的计算。**本研究使用 InVEST 模型来评估麻塔流域的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量。InVEST 模型是美国自然资源项目组开发的、用于评估生态系统服务功能量及其经济价值的一套模型系统<sup>[16]</sup>。InVEST 中包含土壤保持模块,InVEST 计算潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量需要的数据包括:数字高程模型 DEM、降水侵蚀力  $R$  因子、土壤可蚀性  $K$  因子、土地利用因子、流域范围、生物物理系数表。

数字高程模型 DEM 来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>); 降雨侵蚀力  $R$  因子, 通过 Wischmeier 和 Smith 公式计算<sup>[17]</sup>, 降雨数据来自 1960~2000 年全球气候数据插值资料(<http://www.worldclim.org/>); 土壤可蚀性  $K$  因子, 通过 Sharpley 和 Williams 公式计算<sup>[18]</sup>, 具体参数来自延河流域的均值

图 1 延安麻塔流域所在的位置与 2016 年土地利用图



( $0.0547 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>; 土地利用数据基于 Landsat8 遥感影像解译获得, 影像资料也是来自地理空间数据云, 成像日期为 2016 年 9 月 21 日(列号 127、行号 35、云量 7.65%), 解译麻塔流域的植被(土地)类型见图 1(分类精确度 74%、Kappa 值为 0.68)。

麻塔流域的边界通过 ArcGIS 的水文模块分析数字高程模型 DEM 获取; 生物物理系数表中包括  $C$  值和  $P$  值,  $C$  值的计算采用蔡崇法等<sup>[19]</sup>计算公式和雷婉宁等<sup>[7]</sup>整合植被不同层次的相对重要性的方法获取(植被的乔、灌、草层给予相同权重), 计算过程中所用的 NDVI 根据 Landsat8 遥感影像获取[(波段 5- 波段 4)/(波段 5+ 波段 4)];  $P$  值不考虑工程措施对自然植被(森林、灌木、草地)的影响(均赋值为 1), 但考虑中等强度的工程措施对人工植被(果园、农田)的影响(分别赋值为 0.5)<sup>[9]</sup>, 考虑极其强烈的工程措施对其他类型用地(道路和房屋)的影响(赋值为 0)。

**1.2.3 土壤侵蚀控制指数的影响因素。**根据 InVEST 模型获取的潜在土壤侵蚀图与实际土壤侵蚀图, 根据公式(3)(4)计算土壤侵蚀控制指数图。利用 ArcGIS 统计土壤侵蚀控制指数在不同坡向、坡度、坡位以及植被类型等环境梯度上的分布格局, 坡度、坡向和坡位根据 ArcGIS 的地形模块从数字高程模型 DEM 上获取。麻塔流域坡度范围是  $0 \sim 37^\circ$ , 将坡度按照  $5^\circ$  为一个区间, 设置八个等级 ( $0 \sim 5^\circ$ 、 $5 \sim 10^\circ$ 、 $10 \sim 15^\circ$ 、 $15 \sim 20^\circ$ 、 $20 \sim 25^\circ$ 、 $25 \sim 30^\circ$ 、 $30 \sim 35^\circ$ 、 $> 35^\circ$ ); 将坡向分成四个等级(阴坡、阳坡、半阴坡和半阳坡); 将海拔分成三个等级(下坡位、中坡位和上坡位); 植被类型包括 6 个类型(森林、灌木、草地、果园、农田和其他)。利用多因素方差分析(Multi-way ANOVA)探索土壤侵蚀控制指数的影响因子及其相对重要性的大小, 分析在 R 语言上完成。

## 2 结果

通过 InVEST 模型计算的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量表明, 麻塔流域潜在的土壤侵蚀量平均值为  $114100 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 麻塔流域实际土壤侵蚀量平均值为  $8200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ; 模拟得到麻塔流域土壤侵蚀控制指

数图见图 2。图 2A 表明流域整体的土壤侵蚀控制指数很高, 范围从 0.85~1.00 之间, 平均值为 0.92 (图 2C)。模拟得到的土壤保持量的分布图见图 2B, 表明植被具有较强的土壤保持功能, 土壤保持量均值为 104900 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(图 2D), 并且与土壤侵蚀指数图存在较大的空间格局差异。

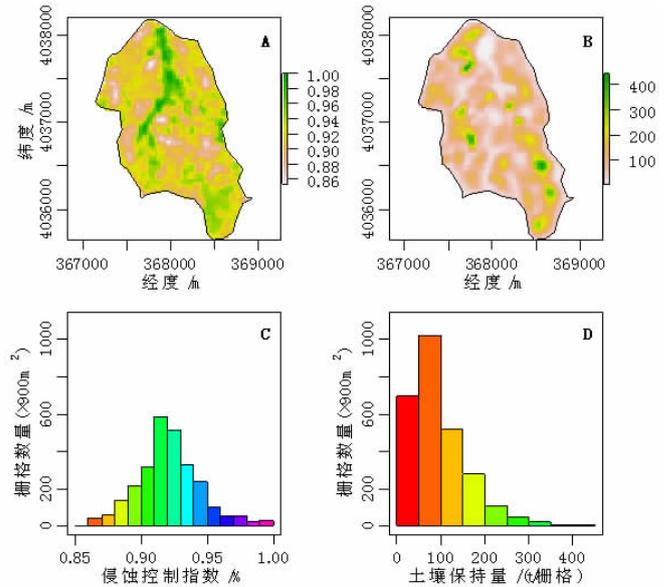
麻塔流域坡度等级的侵蚀控制指数见图 3。图 3A 可以看出小于 5° 的土壤侵蚀控制指数最高, 而大于 35° 的土壤侵蚀控制指数最低。坡向等级的侵蚀控制指数见图 3B, 可以看出阴坡、阳坡、半阴坡和半阳坡的土壤侵蚀控制指数总体均值几乎一致。坡位等级的侵蚀控制指数见图 3C, 结果显示在三个坡位等级上的土壤侵蚀控制指数的均值几乎一致。植被类型等级的侵蚀控制指数见图 3D, 可以看出不同植被类型的土壤侵蚀控制指数差异较大, 森林和其他植被类型的土壤侵蚀控制指数最大, 其次为灌木、果园和农田, 最后为草地植被。

多因素方差分析结果见表 1, 结果表明坡度、坡向、坡位、植被的单独作用和交互作用几乎都显著的影响土壤侵蚀控制指数 (p>0.05)。方差变异分解表明, 植被类型能够解释侵蚀控制指数 72.02% 变异来源, 坡度能够解释侵蚀控制指数 12.09% 变异来源。这意味着植被和坡度因子单独作用能够解释侵蚀控制指数 84.11% 的变异来源, 说明植被和坡度对土壤侵蚀控制指数具有决定性的作用。

### 3 讨论

本文提出土壤侵蚀控制指数的计算方法, 认为土壤侵蚀控制指数相对于土壤保持量更能有效的评估区域水土保持效果。因为土壤侵蚀控制指数是以潜在土壤侵蚀作为对照, 是侵蚀控制的相对比例, 不受到

图 2 麻塔流域土壤侵蚀控制指数与土壤保持量分布图及它们的频率分布

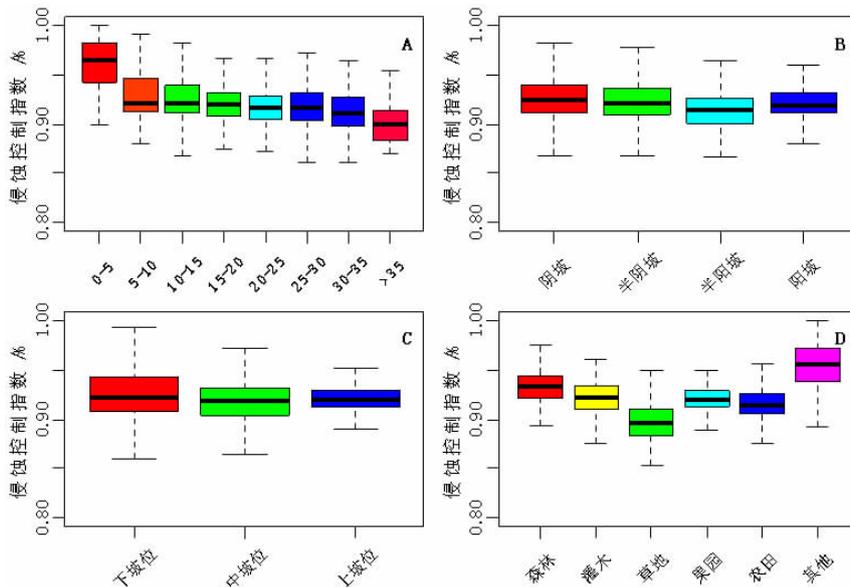


(A) 土壤侵蚀控制指数分布图; (B) 土壤保持量分布图; (C) 土壤侵蚀控制指数频率分布; (D) 土壤保持量频率分布。

潜在土壤侵蚀量区域差异的影响。而土壤保持量指标, 虽然也是以潜在土壤侵蚀量作为对照, 但是该指标是土壤保持量的绝对量, 该指标强烈的受到潜在土壤侵蚀量的异质性影响。

例如在麻塔流域的东部, 主要分布有草地和灌木地, 虽然具有较高的土壤保持量(图 2B), 但是土壤侵蚀控制效果相对较差(图 2A), 原因是流域东部地区坡度较陡, 具有较高的潜在土壤侵蚀量。又比如在麻塔流域的南部的森林植被, 虽然土壤保持量相对较低, 但具有较高的土壤侵蚀控制指数(图 2AB)。如果以土壤保

图 3 麻塔流域土壤侵蚀控制指数的箱体图



(A) 在坡度梯度上的箱体图; (B) 在坡向梯度上的箱体图; (C) 在坡位梯度上的箱体图; (D) 不同植被类型上的箱体图。

表 1 土壤侵蚀控制指数的多元方差分析及其变异分解

变异来源	自由度	总方差	均方	F 值	显著度 @	解释比率
坡度	7	0.137	0.020	74.9	***	12.09
坡向	3	0.023	0.008	29.5	***	4.76
坡位	2	0.017	0.009	32.9	***	5.32
植被	5	0.583	0.117	446.4	***	72.02
坡度:坡向	18	0.013	0.001	2.7	***	0.43
坡度:坡位	11	0.006	0.001	2.1	*	0.35
坡向:坡位	6	0.008	0.001	5.3	***	0.86
坡度:植被	35	0.027	0.001	3.0	***	0.48
坡向:植被	15	0.008	0.001	2.1	**	0.35
坡位:植被	10	0.032	0.003	12.4	***	2.00
坡度:坡向:坡位	26	0.008	0.000	1.1		0.18
坡度:坡向:植被	73	0.030	0.000	1.6	**	0.26
坡度:坡位:植被	49	0.021	0.000	1.6	**	0.26
坡向:坡位:植被	27	0.012	0.000	1.7	*	0.28
坡度:坡向:坡位:植被	51	0.017	0.000	1.3		0.20
残差值		0.614	0.000			0.16

@ 显著度水平:0“\*\*\*”0.001 “\*\*”0.01 “\*”0.05 “.”0.1 “\_”1

持量作为评估指标,会得出森林植被的土壤侵蚀控制效果差于灌草植被,而以土壤侵蚀控制指数就会得出森林植被的土壤侵蚀控制效果优于灌草植被。显然,土壤侵蚀控制指数的评估更可靠。因此,土壤侵蚀控制指数比土壤保持量在区域土壤保持评估中更有优越性。

本研究得到麻塔流域植被的土壤侵蚀控制指数处于 0.85~1.00 之间,平均值为 0.92,说明植被控制土壤侵蚀能力很强,意味着 92% 的潜在土壤侵蚀量都能被植被控制。这个数字略微高于监测到的 1997~2003 燕沟流域平均 83% 的减沙效益<sup>[20]</sup>,说明麻塔流域经过近 20 年的植被恢复,植被控制土壤侵蚀的能力在提高。另一方面,研究得到的麻塔流域土壤侵蚀模数为  $8200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,这个土壤侵蚀模数低于上世纪 60 年代延河流域均值 ( $12980 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[21]</sup>,也低于燕沟流域 1997 年之前土壤侵蚀模数均值 ( $10000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[22]</sup>,这也说明了麻塔流域近 20 年来的植被恢复对土壤侵蚀控制作用提高了。

本研究发现土壤侵蚀控制指数主要受到坡度和植被类型的影响,两者能够解释侵蚀控制指数 84.11% 的变异来源。随着坡度的增加,该控制指数将下降;森林在所有自然植被类型中,具有相对较高的土壤侵蚀控制指数。这说明降低该地区的土壤侵蚀模数有两种方法:(1) 将灌草植被恢复成森林植被;(2) 对植被进行人工水土保持措施。利用植被转换的措施来降低该流域的土壤侵蚀模数的效果不明显,因为麻塔流域的农业生产型景观占据主导地位,其中果园的面积占据流域面积的 49.8%,即使将所有的灌草(占据面积 33.1%)全部恢复成森林,对麻塔流域的土壤侵蚀模数的影响也较小。这也意味着工程措施将在麻塔流域治理土壤流失中发挥重要的作用。

在评估植被结构对潜在土壤侵蚀量的侵蚀控制效率时,尚未考虑工程措施对自然植被(森林、灌木、

草地)的影响<sup>[9]</sup>以及淤地坝工程对所有植被的影响<sup>[23]</sup>,因为工程措施已经超出了自然植被恢复调控土壤侵蚀的范畴。同时也没有考虑侵蚀泥沙在迁移进入河道之前在景观水文通道上的自然运移过程(泥沙输移比)<sup>[6]</sup>。如果按照 InVEST 模型默认的泥沙输移比 0.8 计算麻塔流域的输沙量,结果显示麻塔流域的输沙量均值为  $572 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,该数值高于张宁宁等<sup>[23]</sup>根据淤地坝(闷葫芦坝—湫沟大坝)信息获取的 2003~2011 年麻塔流域周边一个相似小流域(面积  $5.23 \text{ km}^2$ )输沙量均值 ( $497 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),这意味着在该地区进行土壤流失工程治理是迫切的,如修建淤地坝、降雨就地入渗拦截或者修建更多梯田等。目前这些工程已经在麻塔流域周边地区实施<sup>[20,24]</sup>,评估这些水土保持措施对该地区土壤侵蚀控制效率是值得进一步深入研究的科学问题。

#### 4 结论

土壤侵蚀控制指数比土壤保持量在区域土壤流失评估时更能有效的在流域尺度上侦测植被对土壤侵蚀的控制效率。麻塔流域的土壤侵蚀控制指数主要受到坡度和植被类型的影响,两者能够解释侵蚀控制指数 84.11% 的变异来源;随着坡度的增加指数将下降,森林在所有植被类型中,具有较高的土壤侵蚀控制指数。麻塔流域植被结构整体上具有较高的土壤侵蚀控制指数(均值为 0.92),但是同时具有较高的土壤侵蚀模数 ( $8200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),因此采取工程措施治理水土流失必须进一步加强。

#### 参考文献:

- [1] 张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望 [J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 389-396.
- [2] Mullan D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems[J]. Catena, 2013,(109): 234-246.
- [3] Uri N D. Agriculture and the environment-The problem of soil erosion[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2000, 16(4): 71-94.
- [4] 汪东川, 卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述[J]. 中国水土

保持科学, 2004, 2(2): 35-40.

[5] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.

[6] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment [J]. Catena, 2008, 75(3): 268-277.

[7] 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): 68-77.

[8] 史倩华, 王文龙, 刘瑞顺, 等. 植被恢复措施对不同排土年限煤矿排土场边坡细沟侵蚀的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 226-232.

[9] 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.

[10] 王森, 王海燕, 谢永生, 等. 延安市退耕还林前后水土保持生态服务功能评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 280-286.

[11] 陈雅如, 康康谊, 宋富强. 延安市退耕还林前后水土保持功能价值评估[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 67-73.

[12] Huang J. Assessment of potential changes in soil erosion using remote sensing and GIS: a case study of Dacaozi Watershed, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(12): 736.

[13] Perovic V, Zivotic L, Kadovic R, et al. Spatial modelling of soil erosion potential in a mountainous watershed of South-eastern Serbia [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(1): 115-128.

[14] Tosic R, Kapovic M, Lovric N, et al. Assessment of Soil Erosion Potential Using Rusle and Gis: A Case Study of Bosnia and Herzegovina [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2013, 22(11): 3415-3423.

[15] 杜盛, 刘国彬. 黄土高原植被恢复的生态功能[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[16] Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, et al. InVEST3.2 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2015.

[17] Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses [M]. USDA Agricultural Handbook, 1978, (537).

[18] Sharpley AN, Williams JR. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990, (1768).

[19] 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.

[20] 刘普灵, 郑世清, 琚彤军, 等. 黄土高原燕沟流域生态环境建设模式及效益研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 88-91.

[21] 刘万铨. 黄河河龙区间黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀模数与小流域泥沙来源研究[J]. 中国水土保持, 1996, (1): 8-11.

[22] 琚彤军, 刘普灵, 郑世清, 等. 燕儿沟流域泥沙监测初报[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 176-178.

[23] 张宁宁, 刘普灵. 黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵蚀环境演变的泥沙响应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 106-111.

[24] 琚彤军, 刘普灵. 黄土丘陵区规模化生态重建工程资金投入状况及相关问题分析 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 179-182.

作者简介: 李国庆 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植被恢复与 GIS 模拟。

(2019-9-20 收稿 刘晓佳编辑)

文章编号: 1003-7853(2019)06-0068-07

基金项目: 国家自然科学基金(31700624); 曲阜师范大学博士启动基金(bsqd20130136); 曲阜师范大学大学生创新创业训练计划项目(201910446102)

DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2019.06.018

## 组织培养中玻璃化现象的研究进展

赵一鸣, 隋宝凤, 张欣燕,  
侯凯琳, 刘柏玲\*

(曲阜师范大学 生命科学学院, 山东 曲阜 273165)

**摘要:** 组织培养过程中出现的玻璃化现象是限制其发展和组培苗商业化生产的三大主要影响因素之一。据统计, 组织培养过程中出现玻璃化的植物种类目前已达 200 多种。本文就玻璃化苗的形态解剖特征和生理生化特点, 影响玻璃化产生的因素, 玻璃化产生的生理生化变化和基因表达差异, 以及如何预防和减少玻璃化的产生等方面展开论述, 并指出了在玻璃化研究中待解决的一些问题, 期望为组织培养的玻璃化研究提供一定的参考价值。

**关键词:** 组织培养; 玻璃化; 生理变化; 基因表达

中图分类号: Q813.1+2

文献标识码: A

### Research progress of vitrification in plant tissue culture

ZHAO Yi-Ming et al

(College of Life Science, Qufu Normal University,  
Shandong Qufu 273165, China)

**Abstract:** Vitrification is one of the three main factors to limit the development of tissue culture technology and the commercialized production of seedlings in plant tissue culture. So far, there have been more than 200 species with vitrification in plant tissue culture. In this review, we introduced the morphological and anatomical features of the hyperhydric plantlets, discussed the physiological and biochemical characteristics of the vitrification shoots, and analyzed the physiological and biochemical changes and gene expression differences between the normal and vitrification shoots. Additionally, we reviewed some methods to reduce the incidence of vitrification and recover the hyperhydric plantlets to normal ones. We also summarized some questions which have not been researched in present studies of vitrification. It is expected that this review would provide some reference for the research of vitrification in plant tissue culture.

**Key words:** Tissue culture; Vitrification;

Physiological changes; Gene expression

#### 1 玻璃化概况

1964 年, Phillips 和 Mathews 在香石竹 (*Dianthus caryophyllus* L.) 茎尖的组织培养过程中发现并详细描述了玻璃化现象<sup>[1]</sup>。玻璃化是植物在组织培养过程中发