

# 基于文献统计的 CSLE 模型中耕作措施因子的确定

周晓莹, 贾立志, 桑卫国

(中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081)

**摘要:**为了研究 CSLE 模型中  $T$  因子的确定方法, 收集并筛选了关于全国各水土保持区不同保护性耕作措施与传统耕作相比减少侵蚀的研究成果, 利用文献统计的方法, 计算并得出了我国 6 种保护性耕作措施在 6 个水土保持区的  $T$  因子取值。结果表明: (1) 东北黑土区免耕秸秆覆盖、等高耕作和垄作区田 3 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.20 \pm 0.14$ ,  $0.52 \pm 0.25$ ,  $0.15 \pm 0.12$ ; (2) 北方土石山区免耕、垄作区田和等高耕作+植物篱 3 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.51 \pm 0.25$ ,  $0.46 \pm 0.24$ ,  $0.17 \pm 0.09$ ; (3) 西北黄土高原区免耕、免耕秸秆覆盖和等高耕作 3 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.73 \pm 0.17$ ,  $0.69 \pm 0.22$ ,  $0.27 \pm 0.22$ ; (4) 南方红壤区免耕秸秆覆盖和等高耕作 2 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.11 \pm 0.08$ ,  $0.54 \pm 0.32$ ; (5) 西南紫色土区免耕秸秆覆盖、等高耕作、等高耕作+植物篱和聚土免耕 4 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.44 \pm 0.29$ ,  $0.48 \pm 0.27$ ,  $0.47 \pm 0.24$ ,  $0.32 \pm 0.15$ ; (6) 西南岩溶区免耕和等高耕作 2 种保护性耕作措施下,  $T$  因子分别为:  $0.49 \pm 0.33$ ,  $0.38 \pm 0.33$ 。由此可知, 在同一水土保持区, 不同耕作方式的  $T$  因子取值不同, 相同的水土保持耕作措施在不同的水土保持区的  $T$  因子取值也有较大差异。

**关键词:** CSLE 模型; 耕作措施因子; 文献统计; 中国

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0116-06

## Determination of Tillage Factor in the CSLE Model Based on Literature Statistics

ZHOU Xiaoying, JIA Lizhi, SANG Weiguo

(College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to study the method of determining the  $T$  factor in the CSLE model, the results of different conservation farming measures in various soil and water conservation areas were collected and selected in China, the  $T$ -factor values of 6 conservation tillage measures in 6 soil and water conservation areas in China were calculated and obtained by using the literature statistics method. The results showed that: (1) under the 3 conservation tillage measures of no tillage with mulch, contour tillage, and micro-basins tillage in the black soil region of Northeast China, the  $T$  factors are  $0.20 \pm 0.14$ ,  $0.52 \pm 0.25$ ,  $0.15 \pm 0.12$ , respectively; (2) under the 3 conservation tillage measures of no tillage, micro-basins tillage and contour tillage with hedgerow in the mountainous region of North China, the  $T$  factors are  $0.51 \pm 0.25$ ,  $0.46 \pm 0.24$ ,  $0.17 \pm 0.09$ , respectively; (3) under the 3 conservation tillage measures of no tillage, no tillage with mulch and contour tillage in the Loess Plateau region of Northwest China, the  $T$  factors are  $0.73 \pm 0.17$ ,  $0.69 \pm 0.22$ ,  $0.27 \pm 0.22$ , respectively; (4) under the 2 conservation tillage measures of no tillage with mulch and contour tillage in the red soil region of South China, the  $T$  factors are  $0.11 \pm 0.08$  and  $0.54 \pm 0.32$ , respectively; (5) under the 4 conservation tillage measures of no tillage with mulch, contour tillage, contour tillage with hedgerow, and collecting soil to form ridge with no tillage in the purple soil region of Southwest China, the  $T$  factors are  $0.44 \pm 0.29$ ,  $0.48 \pm 0.27$ ,  $0.47 \pm 0.24$ ,  $0.32 \pm 0.15$ , respectively; (6) under the 2 conservation tillage measures of no tillage and contour tillage in the Southwest China karst region, the  $T$  factors are  $0.49 \pm 0.33$  and  $0.38 \pm 0.33$ , respectively. It can be seen that different farming methods have different  $T$  factors in the same soil and water conservation area, and the same soil and water conservation tillage measures have different

收稿日期: 2020-01-02

修回日期: 2020-02-01

资助项目: 中央民族大学青年教师科研能力提升项目“全球近 20 年土壤保持服务变化动态及驱动因子”(2020QNPY92)

第一作者: 周晓莹(1992—), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: icewinchester@163.com

通信作者: 贾立志(1988—), 男, 山东滨州人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: jializhi10000@126.com

values in different soil and water conservation areas. This study can provide the scientific basis for the values of  $T$  factor of different conservation tillage measures in different soil and water conservation areas in the application of CSLE model.

**Keywords:** CSLE model; tillage factor; literature statistics; China

土壤是生态系统的重要组成部分,它是由物理、化学和生物风化作用形成的地壳表层,由矿物颗粒、有机质、水、空气和生物组成<sup>[1-3]</sup>。土壤为人类生存提供了食物和纤维,为农业生产提供了养分和水,为工业生产提供了金属和煤炭,并为各种生物有机体提供了生存空间<sup>[4-5]</sup>。土壤是重要的自然资源,维持着生物地球化学循环,为地球上生命的生存提供了物质基础<sup>[6]</sup>。因此,保护和合理利用土壤资源越来越引起人们的重视。但是,由自然因素和人类活动导致的土壤侵蚀仍是土壤退化的重要原因<sup>[7]</sup>。

土壤侵蚀会引起土壤渗透能力下降、团粒结构减少、养分流失等问题,从而影响了农业生产,制约着经济的快速发展<sup>[8]</sup>。因此研究如何预测和防治土壤侵蚀具有重要的意义。长期以来,土壤侵蚀模型被国内外学者广泛用于水土流失的预测<sup>[9]</sup>。1978年,美国学者 Wischmeier 等<sup>[10]</sup>提出了著名的通用土壤流失方程——USLE 模型,用  $R$  因子(降雨)、 $K$  因子(土壤可蚀性)、 $LS$  因子(坡度及坡长)、 $C$  因子(土地覆盖和管理)和  $P$  因子(水土保持措施)来估算年平均土壤流失量。Renard<sup>[11]</sup>, Hu<sup>[12]</sup>等提出了修正后的通用土壤流失方程——RUSLE 模型,此模型反映了土壤侵蚀与各种影响因素之间的关系,并量化了不同情况下的土壤侵蚀模数。与 USLE 模型相比,RUSLE 模型的计算所依据的资料更多,预测值与前者相比更为精确<sup>[13]</sup>。基于以上模型,我国学者刘宝元等<sup>[14]</sup>通过对我国大部分地区土壤流失数据的分析,改进并提出了适用于中国的土壤流失预报模型——CSLE 模型。在 CSLE 模型中, $C$  因子(土地覆盖和管理)和  $P$  因子(水土保持措施)被替换为  $B$  因子(生物措施)、 $E$  因子(工程措施)和  $T$  因子(耕作措施),来预测不同的水土保持措施下坡耕地的年平均土壤流失量,更符合中国在漫长的水土流失防治历史中对土壤保持的系统实践<sup>[14-16]</sup>。

$T$  因子(耕作措施,  $0 \leq T \leq 1$ )是 CSLE 模型中的一个重要因子,是指保护性耕作方式下的土壤流失量与传统耕作方式下的土壤流失量之比, $T$  因子取值越小,表示实施这种保护性耕作措施所带来的水土保持效益越好<sup>[17]</sup>。 $T$  因子与保土和增产均有密切的关系,并且与  $B$ 、 $E$  因子相比, $T$  因子具有便于实施、见效快、成本低等特点,在全国各地的水土保持工作中

广泛应用。除此之外,目前很多研究也证明了  $T$  因子能够显著地减少坡耕地的水土流失。但是,在 CSLE 模型的计算中, $T$  因子的取值大部分考虑没有水土保持措施,而将其赋值为 1<sup>[18-20]</sup>或对免耕、免耕覆盖等保护性耕作措施未作考虑,仅考虑不同坡度下等高耕作下的  $T$  因子取值<sup>[21-22]</sup>。但是在实际中,会采用许多水土保持耕作措施来减少水土流失,比如:免耕、等高耕作和垄作区田等。也有部分运用 CSLE 模型计算土壤侵蚀率时,会考虑到水土保持耕作措施的影响,而根据一些局部区域的试验得出,并没有很好的代表性,很难在大区域推广使用<sup>[23]</sup>。我国地域广阔,土壤侵蚀地域差异较大。因此,我国水利部将全国分为东北黑土区、北方土石山区、北方风沙区、西北黄土高原区、南方红壤区、西南紫色土区、青藏高原区和西南岩溶区 8 个水土保持区。各区域内气候、土壤、地形等自然环境及农业耕作方式较为一致<sup>[24-25]</sup>。除北方风沙区和青藏高原区之外,其他 6 个区域均以水力侵蚀为主。因此,本文基于已经发表的文献,统计各个水土保持分区的已经发表的野外试验或者径流小区的产沙资料,分析 6 个以水力侵蚀为主的水土保持区不同耕作措施的  $T$  因子的取值,以期 CSLE 模型的应用中  $T$  因子的取值提供理论支撑和科学依据。

## 1 材料与方 法

本文以“耕作”和“产沙”或“侵蚀”或“水土保持”和“中国”为关键词,在 CNKI 及 Web of Science 上搜索、收集 1992—2019 年 10 月发表的文章,并按照以下条件进行筛选:(1) 产沙数据必须从野外观测或试验中获得,在实验室或温室中进行试验的文章剔除;(2) 在研究中,至少报告了一种保护性耕作方法,并用传统耕作作为对照;(3) 文中包含产沙数据以及试验重复次数;(4) 文中的保护性耕作土地和对照组传统耕作土地都处在相同环境条件下(气候、土壤类型、土壤含水量、温湿度、地形、作物、耕作时间等),耕作方式为唯一变量。如此以来,保护性耕作与传统耕作产沙的差异可以看作是由不同耕作方式导致的。

经过筛选,一共得到 84 篇文献,共 646 组产沙数据。其中,对于某一区域,如果某一种耕作方式的样本量少于 10 的话,则认为没有足够代表性,应舍弃,舍弃后剩余 609 组产沙数据。根据本研究的需要,主要收集以下资

料:研究区域经纬度以及所处的水土保持区,保护性耕作方式,保护性耕作下和传统耕作下的产沙量。通常情况下,产沙量的数据在文本中或者表格中体现,如果产沙量以图片形式出现,则运用 GetData Graph Digitizer 2.25 软件提取。总体来说,发表的文献的研究区域都分布在中国 6 个以水蚀为主的水土保持区。T 因子可以根据以下公式计算<sup>[17]</sup>:

$$T = S_1 / S_2 \quad (1)$$

式中:  $T$  为耕作措施因子,无量纲,取值在  $0 \sim 1$ ;  $S_1$  为保护性耕作措施下的土壤流失量;  $S_2$  为同等条件传统耕作措施下的土壤流失量。

## 2 结果与分析

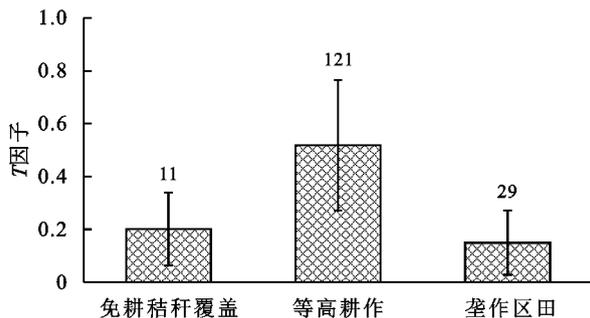
### 2.1 东北黑土区 T 因子取值

东北黑土区土壤以富含腐殖质的黑土为主,土壤肥沃,是我国重要的粮食生产区之一<sup>[26]</sup>。图 1 是所搜集文献中东北黑土区不同保护性耕作措施下  $T$  因子的平均值,由图 1 可知,该地区所采用的保护性耕作措施主要有免耕秸秆覆盖、等高耕作和垄作区田 3 种。在 3 种耕作方式中,等高耕作最多(121 组数据)。 $T$  因子的平均值表现为等高耕作( $0.52 \pm 0.25$ ) > 免耕秸秆覆盖( $0.20 \pm 0.14$ ) > 垄作区田( $0.15 \pm 0.12$ )。垄作区田的  $T$  因子取值最小,说明垄作区田这种保护性耕作措施下水土保持效果最好。Krishna 等<sup>[27]</sup> 研究发现,垄作区田可以有效减少地表径流和增加土壤蓄水量。垄作区田可以通过缩短坡面长度和减小坡面坡度来控制水蚀、截留降水,避免了径流的形成,从而达到保土保水的目的<sup>[28]</sup>。免耕秸秆覆盖的  $T$  因子大于垄作区田小于等高耕作,说明免耕秸秆覆盖在减少土壤流失方面次于垄作区田但优于等高耕作。Zhang 等<sup>[29]</sup> 研究表明,免耕耕作措施下的土壤团聚体含量一般高于传统耕作。Liu 等<sup>[30]</sup> 研究表明,免耕秸秆覆盖可以显著提高土壤孔隙度、土壤饱和含水量和土壤含水量,提高土壤持水能力。但是,长期免耕可能增加土壤容重,降低土壤孔隙度,从而降低土壤导水率<sup>[31]</sup>。有研究表明,免耕秸秆覆盖在减少径流方面不如等高耕作,但在减少土壤流失方面优于等高耕作<sup>[32]</sup>。因此,免耕秸秆覆盖通过改善土壤性质,减少了土壤流失,等高耕作通过截留地表径流和增加渗透,减少了土壤流失。

### 2.2 北方土石山区 T 因子取值

北方土石山区土壤以棕壤、褐土和栗钙土为主,区内土层薄,水土流失造成的危害较大<sup>[24,33]</sup>。由图 2 可知,北方土石山区所采用的保护性耕作措施主要有免耕、垄作区田和等高耕作+植物篱 3 种。在北方土

石山区,采用等高耕作+植物篱这种保护性耕作措施较多(24 组数据),其次是垄作区田(15 组数据)。所搜集文献中, $T$  因子的平均值表现为免耕( $0.51 \pm 0.25$ ) > 垄作区田( $0.46 \pm 0.24$ ) > 等高耕作+植物篱( $0.17 \pm 0.09$ )。等高耕作+植物篱耕作措施下的  $T$  因子取值最小,说明这种耕作方式减少土壤流失的效果最好。Lamichhane<sup>[34]</sup> 研究表明,植物篱显著降低了径流量,从而减少了土壤流失量。有研究发现,草篱平均减少了约 30%~70% 的地面径流,50%~80% 的土壤流失<sup>[35-36]</sup>。植物篱控制水土流失的原因主要是:(1) 植物篱拦截了地表径流;(2) 植物对地面起到了覆盖的作用,减少了雨滴击溅侵蚀;(3) 植物根系改善了土壤的理化性质,提高了土壤渗透能力,增加了土壤肥力<sup>[37-39]</sup>。



注:图中数字标签表示各种保护性耕作措施的数据量,下同。

图 1 东北黑土区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

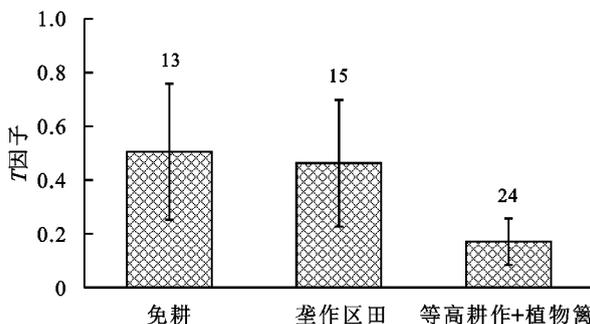


图 2 北方土石山区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

### 2.3 西北黄土高原区 T 因子取值

西北黄土高原区是世界上水土流失最严重的地区之一,土壤以质地松散的黄土为主<sup>[40]</sup>。严重的土壤侵蚀降低了土地生产力,限制了该区域的农业发展<sup>[41]</sup>。由图 3 可知,西北黄土高原区所采用的保护性耕作措施主要有免耕、免耕秸秆覆盖和等高耕作 3 种。所搜集文献中,关于免耕秸秆覆盖这种保护性耕作措施的研究最多(72 组数据)。 $T$  因子的平均值表现为免耕( $0.73 \pm 0.17$ ) > 免耕秸秆覆盖( $0.69 \pm 0.22$ ) > 等高耕作( $0.27 \pm 0.22$ )。等高耕作的  $T$  因子取值最小,说明在西北黄土高原区采用等高耕作这种保护性耕作方式水土保持效果最好。赵龙山等<sup>[42]</sup> 研究表明,等高耕作可以通过增加坡耕地的地表粗糙度、截留地表径

流来控制水土流失,使坡耕地产流量减小 38.17%,产沙量减小 65.6%。免耕和免耕秸秆覆盖  $T$  因子取值较大的原因可能是:免耕和免耕秸秆覆盖通过改善土壤性质减少土壤流失,但由于黄土质地松散,这两种耕作方式所能起到的土壤改良效果有限,导致减少土壤侵蚀的效果并不明显<sup>[31,40]</sup>。

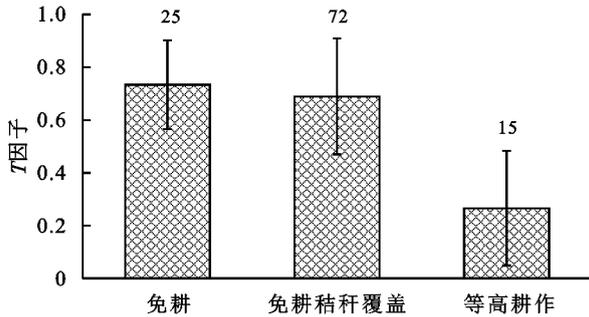


图 3 西北黄土高原区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

## 2.4 南方红壤区 $T$ 因子取值

南方红壤区自然资源丰富,农作物产量高,经济发展迅速。该区域降水较多,水力侵蚀严重<sup>[43]</sup>。由图 4 可知,南方红壤区所采用的保护性耕作措施主要有免耕秸秆覆盖和等高耕作 2 种。该区域等高耕作最多(38 组数据)。 $T$  因子的平均值表现为等高耕作 ( $0.54 \pm 0.32$ ) > 免耕秸秆覆盖 ( $0.11 \pm 0.08$ )。免耕秸秆覆盖的  $T$  因子最小,说明在南方红壤区采用这种耕作方式减少土壤侵蚀效果最好。前人研究表明,免耕秸秆覆盖可以增加地表覆盖,减少雨滴击溅侵蚀,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤持水能力,使土壤养分增加,土壤微生物含量增加,从而减少了水土流失<sup>[30,44]</sup>。由于南方红壤区降水量大且集中,年均降雨量达到 800~2 500 mm,雨滴击溅导致的侵蚀严重,而免耕秸秆覆盖这种保护性耕作措施通过秸秆的覆盖显著减少了雨滴击溅侵蚀<sup>[43]</sup>。等高耕作是南方红壤区较多采用的保护性耕作方式,有研究表明,等高耕作的径流调控效益可达到 72.3%<sup>[45]</sup>。周怡雯等<sup>[46]</sup>研究发现,大雨强降雨下,免耕秸秆覆盖和等高耕作均可以有效减少土壤侵蚀和养分流失,但是免耕秸秆覆盖减少土壤养分流失的效果更好。

## 2.5 西南紫色土区 $T$ 因子取值

西南紫色土区位于长江中上游,土壤以抗蚀性弱的紫色土为主,是重要的农业、矿产基地,该区域土层薄,水土流失严重<sup>[47]</sup>。由图 5 可知,该地区所采用的保护性耕作措施主要有免耕秸秆覆盖、等高耕作、等高耕作+植物篱和聚土免耕 4 种。在 4 种耕作方式中,等高耕作最多(126 组数据)。 $T$  因子的平均值表现为等高耕作 ( $0.48 \pm 0.27$ ) > 等高耕作+植物篱 ( $0.47 \pm 0.24$ ) > 免耕秸秆覆盖 ( $0.44 \pm 0.29$ ) > 聚土免

耕 ( $0.32 \pm 0.15$ )。聚土免耕的  $T$  因子最小,说明这种耕作措施在减少该区域的土壤流失方面表现出最大的优势。聚土免耕是西南紫色土区特有的耕作方式,土壤保持效益优于其他 3 种耕作方式。研究表明,这种保护性耕作方式具有网格状结构,可以有效拦截地表径流并增加土壤入渗。并且,长期聚土免耕可以使土壤养分、微生物含量、土壤酶活性等显著提高,土壤容重显著降低,并能提高作物产量<sup>[48-49]</sup>。

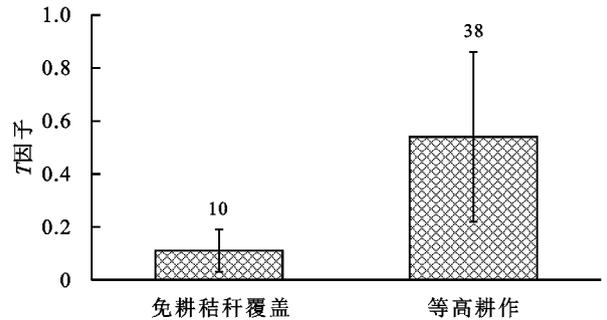


图 4 南方红壤区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

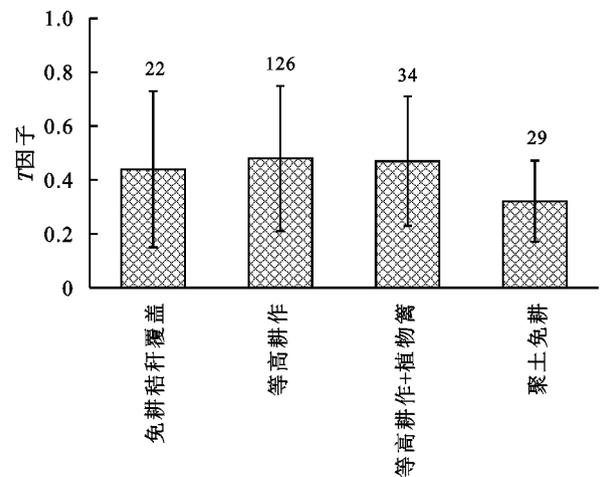


图 5 西南紫色土区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

## 2.6 西南岩溶区 $T$ 因子取值

西南岩溶区成土母质以石灰岩为主,土壤层薄,植被难以生长,土壤流失后易导致石漠化<sup>[24,50]</sup>。由图 6 可知,西南岩溶区所采用的保护性耕作措施主要有免耕和等高耕作 2 种。所搜集文献中,关于等高耕作这种保护性耕作措施的研究最多(15 组数据)。 $T$  因子的平均值表现为免耕 ( $0.49 \pm 0.33$ ) > 等高耕作 ( $0.38 \pm 0.33$ )。在本文提到的 6 个水土保持区中,西南岩溶区关于保护性耕作的报道最少,说明本地区采用保护性耕作措施较少,对此区域保护性耕作措施的研究也较少。在 2 种保护性耕作措施中,等高耕作的  $T$  因子最小,说明本地区采用这种保护性耕作措施的水土保持效益最好。西南岩溶区土壤层薄,只要有降水,就极易造成土壤流失,而等高耕作拦蓄了地表径流,有效减少了土壤流失<sup>[42,51]</sup>。

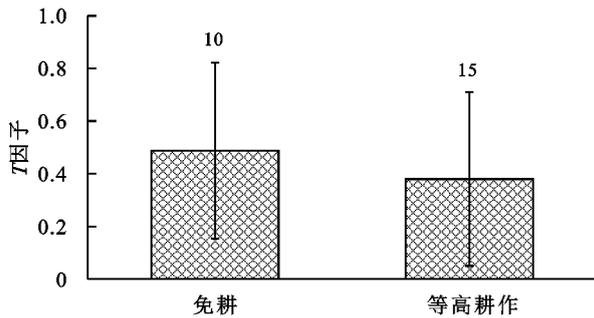


图 6 西南岩溶区不同保护性耕作措施  $T$  因子平均值

本研究发现,同一水土保持区,不同耕作方式的  $T$  因子取值不同。但是相同的水土保持耕作措施在不同的水土保持区的  $T$  因子取值也有较大差异。出现这种情况的原因主要是与各个区域的温度、降水、土壤条件等差异较大有关。等高耕作是各地区采用最多的保护性耕作措施(315 组数据),这种耕作措施下的  $T$  因子在东北黑土区、西北黄土高原区、南方红壤区、西南紫色土区、西南岩溶区的取值为分别为  $0.52 \pm 0.25$ ,  $0.27 \pm 0.22$ ,  $0.54 \pm 0.32$ ,  $0.48 \pm 0.27$ ,  $0.38 \pm 0.33$ 。西北黄土高原的  $T$  因子取值最小,说明西北黄土高原地区采用等高耕作这种保护性耕作措施的水土保持效率最高。这是由于西北黄土高原区是世界上水土流失最严重的地区之一,该地区的土壤以质地松散、易侵蚀的黄土为主,地形沟壑纵横,坡度较大,水土流失分布广泛<sup>[40-41]</sup>。而采用等高耕作可以增加地表粗糙度、截留地表径流,更适应该地区的土壤及地形特征,可有效减少水土流失<sup>[42,52]</sup>。免耕秸秆覆盖也是各地区采用较多的保护性耕作措施(115 组数据),各地区  $T$  因子取值表现为:西北黄土高原区( $0.69 \pm 0.22$ ) > 西南紫色土区( $0.44 \pm 0.29$ ) > 东北黑土区( $0.20 \pm 0.14$ ) > 南方红壤区( $0.11 \pm 0.08$ )。西北黄土高原的  $T$  因子取值最大,南方红壤区最小,说明采用免耕秸秆覆盖这种保护性耕作措施,西北黄土高原地区的水土保持效率最低,南方红壤区最高。南方红壤区水热条件充沛,降水量大且集中,雨滴击溅侵蚀严重,是导致本地区水土流失的主要因素<sup>[43]</sup>。而免耕秸秆覆盖增加了地表覆盖度,大大减轻了雨滴对地表土壤的冲击力,并通过改善土壤质量进一步减少了水土流失<sup>[46]</sup>。总体来看,东北黑土区的  $T$  因子取值相对偏小( $0.29 \pm 0.20$ ),说明东北黑土区采用各种保护性耕作措施的水土保持效率均较高,这与东北黑土区的自然条件密切相关。东北黑土区土壤肥沃,地形以平原为主,地表起伏较小,水土流失主要是由于大规模的土地开发利用导致的<sup>[53]</sup>。在此地区采用保护性耕作措施的水土保持效率较高,尤其是垄作区田,可以有效拦截地表径流,从而起到保水保土的作用<sup>[27-28]</sup>。

### 3 结论

(1) 我国采用的保护性耕作措施主要有免耕、免耕秸秆覆盖、等高耕作、垄作区田、等高耕作+植物篱和聚土免耕 6 种。其中,等高耕作在除北方土石山区之外 5 个水土保持区中均为主要的保护性耕作措施,聚土免耕是西南紫色土区特有的保护性耕作措施。6 个水土保持区中,关于西南紫色土区保护性耕作的研究最多,西南岩溶区研究最少。

(2) 由于不同水土保持措施减少土壤侵蚀的机理不同,在同一水土保持区,不同耕作方式的  $T$  因子取值不同。由于气候、地形、土壤等条件的差异,相同的水土保持耕作措施在不同的水土保持区的  $T$  因子取值也有较大差异。

#### 参考文献:

- [1] Keesstra S D, Bouma J, Wallinga J, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals[J]. *Soil*, 2016, (2):111-124.
- [2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348(6235):1261071-1261077.
- [3] 吴春发.复合污染土壤环境安全预测预警研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils[J]. *Nature News*, 2015, 528(7580):32-33.
- [5] 冷疏影,冯仁国,李锐,等.土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J].*水土保持学报*, 2004, 18(1):1-6.
- [6] 潘根兴,程琨,陆海飞,等.可持续土壤管理:土壤学服务社会发展的挑战[J].*中国农业科学*, 2015, 48(23):4607-4620.
- [7] Stoorvogel J J, Bakkenes M, Brink B T, et al. To what extent did we change our soils: A global comparison of natural and current conditions[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7):1982-1991.
- [8] 王占礼.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].*农业工程学报*, 2000(4):32-36.
- [9] 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):37-42.
- [10] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]// *Agriculture Handbook 537*. Washington DC: United States Dept. of Agriculture, 1978.
- [11] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE)[M]. Washington DC: United States De-

- partment of Agriculture, 1997.
- [12] Hu S, Li L, Chen L, et al. Estimation of soil erosion in the Chaohu Lake Basin through modified soil erodibility combined with gravel content in the RUSLE model[J]. *Water*, 2019, 11(9):1806-1826.
- [13] 吴长文, 李凤. 最新侵蚀模型的应用前景[J]. *水土保持科技情报*, 1996(4):60-63.
- [14] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[C]// *Process of Soil Erosion and Its Environment Effect Volume II*. 12th ISCO Beijing: Tsinghua Press, 2002.
- [15] 章文波, 刘宝元. 基于 GIS 的中国土壤侵蚀预报信息系统[J]. *水土保持学报*, 2003(2):89-92.
- [16] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5):61-66.
- [17] 郭乾坤, 刘宝元, 朱少波, 等. 中国主要水土保持耕作措施因子[J]. *中国水土保持*, 2013(10):22-26.
- [18] 俱战省, 文安邦, 严冬春, 等. 基于  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{210}\text{Pb}$  和 CSLE 的三峡库区小流域土壤侵蚀评估[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3):75-80.
- [19] 邱娅柳, 耿韧, 洪静雨, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的高淳慢城土壤侵蚀评估[J]. *江苏水利*, 2018(9):19-25.
- [20] 卢刚. 基于 CSLE 模型的天山北坡西白杨流域土壤侵蚀定量评价[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2):124-130.
- [21] 王超. 基于 RS/GIS 的渭河流域土壤侵蚀评价研究[D]. 西安:西北大学, 2010.
- [22] 王琦. 基于 GIS 与遥感的藉河示范区水土保持效益评价研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2010.
- [23] 陈美淇, 魏欣, 张科利, 等. 基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):16-21, 26.
- [24] 王治国, 张超, 孙保平, 等. 全国水土保持区划概述[J]. *中国水土保持*, 2015(12):12-17.
- [25] 赵岩, 王治国, 孙保平, 等. 中国水土保持区划方案初步研究[J]. *地理学报*, 2013, 68(3):307-317.
- [26] 李然嫣. 我国东北黑土区耕地利用与保护对策研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
- [27] Krishna, Hari J. Modelling the effects of tied-ridging on water conservation and crop yields[J]. *Agricultural Water Management*, 1989, 16(1/2):87-95.
- [28] Wiyo K A, Kasomekera Z M, Feyen J. Effect of tied-ridging on soil water status of a maize crop under Malawi conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(2):101-125.
- [29] Zhang F Y, Wu P T, Zhao X N, et al. The effects of no-tillage practice on soil physical properties[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(77):17645-17650.
- [30] Liu Y, Gao M, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130:7-12.
- [31] Mohammadshirazi F, McLaughlin R A, Heitman J L, et al. A multi-year study of tillage and amendment effects on compacted soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203:533-541.
- [32] Gao L, Bowker M A, Xu M, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105:49-58.
- [33] 李秀彬, 马志尊, 姚孝友, 等. 北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008(1):9-15.
- [34] Lamichhane K. Effectiveness of sloping agricultural land technology on soil fertility status of mid-hills in Nepal[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4):767-775.
- [35] Wu J Y, Huang D, Teng W J, et al. Grass hedges to reduce overland flow and soil erosion[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2):481-485.
- [36] Xiao B, Wang Q, Wu J, et al. Protective function of narrow grass hedges on soil and water loss on sloping croplands in Northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4):653-664.
- [37] 尹迪信, 唐华彬, 朱青, 等. 植物篱逐步梯化技术试验研究[J]. *水土保持学报*, 2001(2):84-87.
- [38] 蒲玉琳, 谢德体, 丁恩俊. 坡地植物篱技术的效益及其评价研究综述[J]. *土壤*, 2012, 44(3):374-380.
- [39] 湛芸. 植物篱对紫色土水土特性的效应及作用机理[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- [40] Wang Y, Liu W, Li G, et al. A bibliometric analysis of soil and water conservation in the Loess Tableland-Gully Region of China[J]. *Water*, 2019, 11(1):20-34.
- [41] Huang X, Wang L, Lu Q. Vulnerability assessment of soil and water loss in loess plateau and its impact on farmers' soil and water conservation adaptive behavior[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12):4773-4790.
- [42] 赵龙山, 宋向阳, 梁心蓝, 等. 黄土坡耕地耕作方式不同时微地形分布特征及水土保持效应[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2):64-70.
- [43] 林盛. 南方红壤区水土流失治理模式探索及效益评价[D]. 福州:福建农林大学, 2016.
- [44] 赵继浩, 李颖, 钱必长, 等. 秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):272-280, 287.

- [34] 李成亮,孔宏敏,何园球,施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):116-119.
- [35] 董林林,张海东,于东升,等.引黄灌溉耕作对剖面土壤有机质组分构成的影响[J].土壤学报,2017,54(3):613-623.
- [36] Angers D, N'dayegamiye A, Côté D. Tillage-induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass [J]. Soil Science Society of America Journal (USA), 1993,57(2):512-516.
- [37] 孙梅,黄运湘,孙楠,等.农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J].土壤通报,2015,46(1):233-238.
- [38] 杜满聪,李江涛,李淑玲,等.不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响[J].广州大学学报:自然科学版,2018,17(6):74-80.
- [39] 王殿武,褚达华.少、免耕对旱地土壤物理性状的影响[J].河北农业大学学报,1992,15(2):28-33.
- [40] 虞娜,金鑫鑫,安晶,等.玉米田耕层不同类型土壤孔隙及库容特征的研究[J].沈阳农业大学学报,2014,45(6):685-690.
- [41] 孙国峰,张海林,徐尚起,等.轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):66-71.
- [42] 李文杰,张展羽,王策,等.干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J].农业工程学报,2015,31(8):126-132.
- [43] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.
- [44] 冯杰,郝振纯.CT扫描确定土壤大孔隙分布[J].水科学进展,2002,13(5):611-617.
- [45] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2009,104(1):173-179.
- [46] 赵丽萍,刘家勇,赵培方,等.水分胁迫对甘蔗根系及地上部生长的影响[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2019,45(1):10-15.
- [47] 王卫华,张志鹏.基于土壤导气率的燥红土孔隙结构及弯曲连通性研究[J].土壤学报,2018,55(2):360-368.
- [48] Gómez J A, Giráldez J V, Pastor M, et al. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard [J]. Soil & Tillage Research, 1999,52(3):167-175.
- [49] 相方园.土壤孔隙三维构建与特征表达[D].武汉:华中农业大学,2008.
- [50] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等.保护性耕作条件下旱地农田麦豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J].生态学报,2006(4):210-219.
- [51] Hu X, Li X Y, Wang P, et al. Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:21-30.

(上接第 121 页)

- [45] 胡建民,胡欣,谢颂华.南方红壤坡地几种典型治理措施的径流调控效应[J].水土保持通报,2013,33(6):32-36,41.
- [46] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):49-54.
- [47] 鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等.西南紫色土区水土流失综合治理技术体系[J].水土保持通报,2018,38(3):143-150.
- [48] 朱波,陈实,游祥,等.紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J].土壤学报,2002(5):743-749.
- [49] 郭永明.四川盆地的水土流失特征与水土保持防护体系建设[J].中国水土保持,1992(5):9-13.
- [50] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J].中国水土保持科学,2008,6(6):1-7,20.
- [51] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等.西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J].水土保持研究,2011,18(1):66-70.
- [52] Alex M, JesúsÁ, Rafael G. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter [J]. Soil & Tillage Research, 2016,161:19-30.
- [53] 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.