

DOI: 10.5846/stxb201306151710

冯强, 赵文武.USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展.生态学报, 2014, 34(16): 4461-4472.

Feng Q, Zhao W W. The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4461-4472.

USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展

冯 强^{1,2}, 赵文武^{1,*}

(1. 北京师范大学资源学院, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 山西农业大学林学院, 太谷 030801)

摘要: 通用土壤流失方程 (USLE) 及修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 是世界范围内应用最广泛的土壤侵蚀预报模型, 模型中 C 因子表示植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的作用, 是人为控制土壤侵蚀的重要因子。回溯了 C 因子发展演变历程, 依据国内外最新研究成果, 系统阐述了不同尺度 C 因子估算方法。在小区、坡面、小流域尺度上, C 因子确定主要依赖于野外实验观测, 研究条件的一致性尤其是标准小区的统一是 C 因子值可比性的前提。流域、区域尺度 C 因子确定通常需要利用遥感影像, 遥感技术的发展促进了流域、区域尺度 C 因子估算方法的进步, 使提取的 C 因子图更加精细、准确, 但是使用遥感数据全面刻画 C 因子含义仍然是一大挑战, 因此仍需加强 C 因子相关研究。共归纳了 10 种确定 C 因子的方法, 介绍了不同方法的优缺点及适用条件, 提出了我国 C 因子研究应加强的工作, 希望为相关领域研究者提供参考。

关键词: 植被覆盖与管理因子; 尺度; 土壤侵蚀; 通用土壤流失方程/修正通用土壤流失方程 (USLE/RUSLE)

The study on cover-management factor in USLE and RUSLE: a review

FENG Qiang^{1,2}, ZHAO Wenwu^{1,*}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030801, China

Abstract: The Universal Soil Loss Equation (USLE) and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) are two most widely soil erosion prediction models worldwide. In both of these models, C factor, i.e., the Cover-Management Factor, quantifies the effects of vegetation cover and management practices on soil erosion, which is the most important factor in USLE/RUSLE models that can be easily controlled to alleviate soil erosion. The authors reviewed the evolvement of C factor and concluded various estimation methods for C factor at different scales by integrating recent domestic and international developments in this field. Therefore, five methods to quantify C factor were summarized at plot, hillslope and small watershed scales: 1) Obtaining C factor values from USLE/RUSLE handbooks; 2) Estimating C factor values based on the definition of C factor; 3) Computing C factor values by its sub-factors; 4) Calculating C factor values using inverse method based on the USLE/RUSLE ($C=A/(R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot P)$); 5) Assessing C factor with linear and nonlinear models between C factor and vegetation coverage. Currently, estimation of C factor mainly depended on field experiments and observations at plot, hillslope and small watershed scales. Thus, the consistency of experimental conditions among different experiments, especially the consistency of standard runoff plots, is important and a prerequisite for comparability of C factor values. Once again, five methods to quantify C factor at watershed, region scales were summarized as well: 1) Assigning C -factors values from reported values in literature according to land-cover/land-use categories; 2) Estimating C factor values at larger scales by equations based on relationships between C factor values and vegetation coverage acquired at smaller scales; 3) Performing direct regression between image bands ratios / vegetation indices and C factor values determined in the field; 4)

基金项目: 国家自然科学基金 (41390462, 41171069)

收稿日期: 2013-06-15; 网络出版日期: 2014-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

Estimating C factor values by linear Spectral Mixture Analysis; 5) Improving in mapping of C factor values by geostatistical methods with remote sensing images. In general, at watershed and region scales, C factor values were usually estimated by using remote sensing images, The development of remote sensing technology promoted the evolvement of C factor estimation methods, which makes C factor mapping more precise. However, full interpretation of C factor values by using remote sensing data remains a major challenge, requiring further research on C factor. In conclusion, the authors summarized 10 ways to estimate C factor values, their advantages and disadvantages and also their applicable conditions in detail. Furthermore, the authors emphasized the important aspects of further research on C factor in future and wished extensive involvement of more researchers in this field.

Key Words: cover-management factor; different scales; soil erosion; Universal Soil Loss Equation/Revised Universal Soil Loss Equation (USLE/RUSLE)

通用土壤流失方程 (USLE)^[1-2] 和修正通用土壤流失方程 (RUSLE)^[3] 是美国农业部开发的预报坡地年均土壤流失量的经验模型, 随着 GIS 和 RS 技术的发展, USLE/RUSLE 现已应用于流域、区域尺度土壤流失预测。USLE/RUSLE 模型结构简单、参数较少、所需数据容易获取, 使其成为世界范围内应用最广泛的土壤侵蚀预报模型。USLE/RUSLE 模型形式为: $A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, 式中, A 为年均土壤流失量, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, LS 为坡度坡长因子或称为地形因子, C 为植被覆盖与管理因子, P 为水土保持措施因子。植被覆盖与管理因子 (Cover-Management Factor, 以下简称 C 因子) 用来表示植被覆盖和管理措施对土壤侵蚀的影响。植被的林冠层、灌木层能够拦截降雨, 使降雨再分配, 改变降雨动能; 草本层更加贴近地表, 不仅能够减少降雨击溅侵蚀, 同时能够减少地表径流动能; 枯枝落叶层除截留降水外, 能够降低径流速度, 增加水分入渗。在 USLE 和 RUSLE 中, R 因子、 K 因子、 LS 因子依赖于自然地理条件, 短期内水土保持活动不会改变这些因子, 而水土保持措施 (P) 的建设需要大量的资金和人力投入, 通过调整土地利用方式及改善管理措施 (降低 C 因子) 能够以最小的资金投入降低土壤侵蚀。 C 因子值是模型诸因子中变化幅度最大的, 可相差 2—3 个数量级。研究认为 C 因子和 LS 因子对土壤侵蚀最敏感^[4], 对 USLE 整体有效性的作用是最显著的^[5]。植被覆盖与管理不仅是 USLE/RUSLE 的重要因子, 还应用于其他土壤侵蚀模型, 如非点源流域环境响应模型 (ANSWERS)、水蚀预报模型 (WEPP)、地中海区域土壤侵蚀预报模型 (SEMMED)^[6-7]。

C 因子估算涉及多个尺度, 小区、坡面、小流域尺度面积相对较小, 从几平方米到几十平方公里不等, 可以利用径流小区、坡面、小流域卡口站土壤流失数据估算 C 因子; 流域、区域尺度面积大, 不能直接利用土壤流失数据估算 C 因子。不同尺度 C 因子估算方法在理论或实践上均存在各自的问题。在小区、坡面、小流域尺度, C 因子确定主要依赖野外实测, 研究方法的统一是不同学者、不同地区 C 值可比性的前提。在流域、区域尺度, C 因子确定主要依赖遥感影像。 C 因子包含了与植被相关的地上、地表、地下、土壤等诸多因素的作用, 单一的遥感影像难以完全刻画 C 因子, 这既是一个重要的科学问题也是一个关键的应用难题。依据国内外相关文献, 综述了不同尺度 C 因子确定方法, 评介了不同方法的优缺点和适用条件, 以为不同尺度 C 因子的研究提供借鉴。

1 植被覆盖与管理因子的定义及发展演变

C 因子定义为在一定地表覆盖和管理措施下土壤流失量与同等条件下适时翻耕、连续休闲对照地上土壤流失量之比。 C 值大小还取决于作物不同生长期侵蚀性降雨的多寡, 全年平均 C 值需要根据降雨侵蚀力年内季节分布进行加权计算。

1965 年版 USLE^[1] 划分了 5 个农作期, C 因子主要是定性的考虑作物覆盖、耕作历史、生产力水平、作物残体、轮作和冬季覆盖物等因子的作用。在观测数据的基础上, USLE 手册给出了主要农作物和耕作制度下土壤流失比率表。1978 年版 USLE^[2] 划分了 6 个农作期, 增加了适用于水土保持耕作法的土壤流失比率表。早期 USLE 是用来预测不同作物系

统的片蚀和细沟侵蚀,1970 年代早期美国农业部开始讨论将其应用到牧草地等非扰动地区,但是由于缺少这些地区径流小区数据,Wischmeier 在 1975 年提出一个次因子方法来确定牧草地和林地的 C 因子,Wischmeier 和 Smith 1978 年提出用冠层覆盖、地表覆盖、地下残体作用(如根系)、耕作方式等次因子来确定 C 因子。可见,尽管 1978 年版的 USLE 沿用了前一版本 C 因子估算方法,但同时提出了次因子概念并扩大了应用范围。Dissmeyer 和 Foster^[8] 对其进行修正并增加次因子以适应林地状况,包含的次因子有土壤表面覆盖(枯枝凋落物、砾石)、裸土百分比、冠层盖度、土壤紧实度、有机质含量、细根生物量、残渣固结作用和土壤储水量。

RUSLE^[3] 不再使用基于观测数据的土壤流失率表,土壤流失率(SLR)计算主要考虑 5 个次因子:前期土地利用次因子(PLU)、冠层覆盖次因子(CC)、地面覆盖次因子(SC)、表面糙度次因子(SR)、土壤水分次因子(SM)。 $SLR = PLU \cdot CC \cdot SC \cdot SR \cdot SM$ 。RUSLE 不再划分农作期,而是以 15d 为步长计算半月土壤流失率。RUSLE 提供的计算机程序包含作物数据库、管理措施数据库、气候数据库,只要用户输入所需参数,计算机程序就可以输出 C 因子值,而且用户可以自行扩展数据库,扩大应用范围。

Liu 等^[9] 借鉴 USLE/RUSLE 的成功经验,建立了中国土壤流失方程 CSLE。根据中国实际将 USLE/RUSLE 的 C 、 P 两个因子变为 B 、 E 、 T 三个因子, B 、 E 、 T 分别是用于水土保持的生物、工程、耕作措施因子。CSLE 现已成功应用于第 1 次全国水利普查水土保持情况普查^[10], B 、 E 、 T 因子的确定方法与 C 、 P 因子相似,在小区、坡面、小流域尺度主要依赖实验观测,我国已积累了相关查询表。在流域、区域尺度, B 、 E 、 T 因子的确定依赖遥感影像与野外调查。 B 、 E 、 T 因子是 C 、 P 因子的中国化,其本质含义与 C 、 P 因子相同。

2 小区、坡面、小流域尺度 C 因子确定方法

USLE/RUSLE 在美国开发并在世界范围内推广使用。不同研究区与模型建立地区的环境差异不尽相同,人们往往根据实际情况选择一种方法或综合不同方法来确定 C 因子。总体来看,小区、坡面、小流域尺度 C 因子确定方法如下。

2.1 手册查询法

当研究者认为研究区环境与 USLE/RUSLE 构建区域相近时,直接利用 USLE 或 RUSLE 手册提供的查询表确定 C 值。如 Spaeth 等^[11] 在不同草地植被类型上使用模拟降雨方法评估 USLE 和 RUSLE 预测土壤流失效果时,分别使用 USLE 和 RUSLE 提供的查询表确定美国 8 个州 32 个研究地 132 个草地小区的 C 值。同样,Gabriels 等^[12] 通过 USLE 查询表估计比利时 Kemmelbeek 流域 40 种作物轮作系统的 C 值。通过模型手册直接查询相应参数来获取 C 值简单快速,但研究区环境及管理措施千差万别,查询获得的 C 值难以在大部分地区适用。

2.2 标准小区法

这是确定不同作物 C 值的基础方法。根据 C 因子定义,一定地表覆盖和管理措施下的土壤流失量与标准小区土壤流失量之比为 C 值,标准小区定义为坡长水平投影为 22.1 m,坡度 9%,适时翻耕、连续休闲小区。我国学者通过径流小区实验得到中国东北^[13]、西北^[14]、西南^[15]、华东^[16] 等地区不同作物及管理措施下 C 因子值。我国主要农作区、主要作物的 C 因子值均已学者确定。同一个研究者得到的不同作物、不同作物生长期 C 值相差甚微,而不同研究者得到的同一作物 C 值相差较大,不具有可比性。主要原因是标准小区不一致,生长季划分不同, C 因子计算较少考虑降雨侵蚀力(EI)季节分布。我国学者张科利提出适合我国的标准小区为 15°坡度、20 m 坡长、5 m 宽休闲地^[17],水利部同样颁布了《水土保持监测技术规程》(SL277—2002),规定了标准小区的建设与观测方法。这将有利于我国 C 因子测定的规范化,提高不同地区 C 值的可比性。

2.3 次因子法

虽然仍有学者利用 Dissmeyer 和 Foster 早期确定的次因子法^[8] 计算 C 值,如 Zhang 等^[18] 和 De Asis 和 Omasa^[7] 分别用该方法进行了林地 C 因子计算,但目前广泛使用的是 RUSLE 提供的次因子法^[3]。每个次因子都有具体计算公式,关键是获得次因子计算需要的参数。冠层郁闭度、雨滴降落高度、地表盖度、根系生物量、地表随机糙度、土壤含水量一般通过样地实测,土壤表面稳定性因子、地上地下残体分解速率等参数不易测定,往往需要查询 RUSLE 手册或参考当地相关研究。获得各个参数后,通过次

因子计算公式或 RUSLE 计算机程序即可得到 C 因子值。该方法在耕地^[19]、草地^[11]、林地^[20]以及火烧后不同生态恢复措施^[21]的 C 因子测算研究中都有广泛应用。研究中参数获取主要依靠野外实测,过多的依靠 RUSLE 手册提供的查询表往往会带来 C 因子估算的不准确性^[21]。

2.4 USLE 方程反用法

直接利用 USLE 计算 C 因子, $C=A/(R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot P)$, 需要对除 C 因子以外的其他因子进行测定。Novara 等^[22]使用该方法计算传统耕作葡萄园和覆盖作物耕作葡萄园的 C 因子。也有学者将 C 因子和 P 因子结合成 CP 因子, 在小区和小流域尺度^[23]、微集水区尺度^[24]计算了林地和作物 CP 因子。Cinnirella 等^[25]将小流域分成若干植被单元和裸地单元, 小流域总产沙量是植被单元和裸地单元产沙量之和, 规定裸地 C 因子为常数, 计算植被 C 因子并分析其月变化和年变化。该法计算 C 因子需要测定其余所有因子, 随着尺度增大尤其费时费力, 不易

推广。

2.5 C 因子与盖度关系式法

对于除美国以外的其他国家来说, 农业轮作系统径流小区数据十分缺乏, 难以通过土壤流失率直接计算 C 值, 对于草地和林地更是如此^[26]。因此出现了大量利用植被盖度估算 C 值的方法, 即先通过径流小区实验, 获得 C 值和植被盖度关系式, 而后只需测定植被盖度即可推算出 C 值。 C 因子与植被盖度关系模型形式有线性^[27]、指数^[14,28]、对数^[29-30]等。以上关系式中植被盖度未考虑群落层次结构, 刘宝元等^[26]将 C 因子分解为两个子因子: 冠层覆盖因子 C_c 和地表覆盖因子 C_s , C 因子计算式为 $C=C_c \cdot C_s$ 。不同学者 C 因子与盖度关系式详细情况见表 1。通过关系式可以简单快速的得到 C 因子, 但是以上研究 C 因子计算方法不一致、标准小区不统一, 所建立的关系式可比性相对较差, 难以判断通过哪些关系式能够得到可靠的 C 因子值。

表 1 中国 C 因子与植被盖度关系式列表

Table 1 The relation equation between Cover-Management Factor (C factor) and vegetation coverage

文献来源 References	C 因子与植被盖度 V (%) 关系式 Relation equation between C factor and vegetation coverage (%)	植被类型 Vegetation type	C 因子计算方法 Method for computing C factor	研究区域 Study area
[28]	$C = 0.992 \exp(-0.0344V)$	牧草	标准小区法计算 C 值, 标准小区 为覆盖度 1.9% 小区	黄甫川流域
[14]	草地: $V > 5$ $C = \exp[-0.0418(V-5)]$ 草地: $V \leq 5$ $C = 1$ 林地: $V > 5$ $C = \exp[-0.0085(V-5)^{1.5}]$ 林地: $V \leq 5$ $C = 1$	草地、林地	标准小区法计算 C 值, 标准小区 为裸露农地	陕西安塞县
[27]	7 月: $C = 0.4149 - 0.0052V$ 8 月: $C = 0.4399 - 0.00578V$ 全年: $C = 0.45 - 0.00786V$	低矮灌丛草甸	标桩法测定土壤流失量, 公式法 计算 C 值	张家口水保站、 江西红壤生态 实验站
[29]	$C = 0.779 + 0.595 \log 0.01V$	作物	标准小区法计算 C 值, 标准小区 为无植被覆盖小区	黄土高原 (西峰、淳化)
[30]	$V = 0$ $C = 1$ $0 < V < 78.3$ $C = 0.6508 - 0.3436 \lg V$ $V > 78.3$ $C = 0$	作物、果园	公式法计算 C 值	三峡库区
[26]	作物地: $C_c = 1 - (0.01V_c + 0.0859) \exp(-0.0033h)$ $C_s = \exp(-0.0206V_R)$ 草地: 参考作物地公式 人工林地: $C_c = 0.988 \exp(-0.11V_c)$; $C_s = \exp(-0.0206V_R)$ C_c 、 C_s 分别为冠层覆盖因子、地表覆盖因子; V_c 、 V_R 分别为冠层盖度(%)、地表盖度(%) h 为冠层高度(cm)	作物 草地 人工林地	标准小区法计算 C 值, 标准小区 为裸地小区	北京地区

3 流域、区域尺度 C 因子估算

USLE/RUSLE 在流域、区域尺度的推广应用为水土保持规划提供了有力支持,如何提高流域、区域尺度 C 因子估算精度成为 USLE/RUSLE 预测土壤侵蚀准确性的关键。随着遥感技术的发展, C 因子提取方法也在不断进步,逐渐接近 C 因子所包含的植被和管理信息。流域、区域尺度 C 因子估算主要有以下方法。

3.1 土地利用/覆盖类型直接赋值法

通过遥感影像分类^[31-32]获取土地利用图,或直接收集土地利用资料^[33-34],然后将相似地区文献记载的 C 值赋给相应土地利用类型。也有学者自行计算典型土地类型的 C 值然后进行流域、区域尺度赋值^[35]。类似的,还有通过遥感解译植被盖度级别,然后将文献中 C 值赋予不同盖度级别^[36],或同时考虑土地利用类型和盖度级别进行赋值^[37]。土地利用/覆盖类型赋值法简单易行,在世界范围内广泛使用,但该方法获得的 C 值为一恒定常数,没有考虑同一土地利用类型的时空异质性,尤其在中国丘陵山区植被密度不均、田块破碎、农户个体经营的情况下更容易带来较大的 C 因子估计误差。同时不同精度遥感影像也会对土地利用类型或盖度级别的解译精度带来影响,进而影响 C 值估算的准确性。

3.2 基于小区、坡面尺度 C 因子与植被盖度关系式估算流域、区域尺度 C 因子

小区、坡面尺度研究表明土壤侵蚀和植被盖度存在负相关关系,植被盖度是构成 C 因子的重要因素,研究者构建了很多 C 因子和盖度关系式(见表 1)。通过植被指数或混合像元线性分解反演流域、区域尺度植被盖度,或通过流域小班调查获得植被盖度^[38],然后通过小区、坡面尺度的关系式计算流域、区域尺度 C 因子。目前,应用最多的是蔡崇法等^[30]在三峡库区建立的关系式,众多学者^[39-43]利用该关系式进行了流域、区域尺度 C 因子估算,研究区包括江西、福建、甘肃、岷江流域、新疆艾比湖地区。潘美慧等^[44]应用了江忠善等^[14]在陕北建立的关系式进行了东江(属珠江水系)流域 C 因子估算。

该方法在中国广泛使用,但不同地区植被类型与土壤侵蚀环境差异较大,某一地区建立的 C 因子与盖度关系式在其他地区是否适用需要进一步验

证。再者,小区、坡面尺度建立的关系式应用于流域、区域尺度是尺度上推的过程,还需进行尺度效应分析与尺度转换研究。此外,通过遥感影像提取的植被盖度通常不包括地表枯枝落叶层,而地表枯枝落叶覆盖的减蚀作用比冠层覆盖更重要^[45],因此,还需开展通过遥感技术提取地表枯枝落叶层盖度的研究。

3.3 通过遥感影像波段组合或植被指数直接估算 C 因子

为了克服土地利用类型赋值法无法反映 C 因子时空变异的缺点,有学者提出建立 C 值与遥感信息(波段组合或植被指数)的回归方程,再通过回归方程反演地面 C 值。波段组合或植被指数能降低遥感数据信息冗余,最大程度反映植被特点。通过土地利用图与遥感影像叠加,提取各个土地利用类型内平均的波段组合或植被指数值,参照文献中不同土地利用类型的 C 值,建立两者的回归方程^[46-48]。或通过野外实测 C 因子,建立 C 因子与相同地理位置遥感像元波段组合或植被指数的关系方程^[6-7,49-51]。该方法在非采样区估算的 C 因子可能会出现负值或极大值,通常将负值赋值为 0,将极大值赋值为 1。已有研究所构建的关系方程的详细信息见表 2。各植被类型可以共同建立统一的关系方程,或每种植被类型建立各自的关系方程,后者 C 因子与波段信息的相关系数要高于前者^[50]。关系方程结合多时相遥感数据可以获得 C 因子时间与空间变异信息,提高土壤侵蚀预测效果。

归一化植被指数 NDVI 是目前评估植被覆盖使用最广泛的植被指数,NDVI 对植被生命力敏感,因为植被生长初期强烈的叶绿素活力,NDVI 会带来植被覆盖的高估,相反,NDVI 带来衰老植被覆盖的低估,而对于土壤侵蚀过程,初期植被和衰老植被的水土保持作用相差不大。因此 C 因子与 NDVI 之间的回归方程效果不好^[7,49],Wang 等^[49]甚至发现 NDVI 与 C 因子相关性低于 TM 影像 band1—band7 任一波段与 C 因子的相关性。增强型植被指数 EVI 提高了对高生物量区植被的敏感度,同时通过削弱冠层背景信号和降低大气影响,改善了对植被的监测^[52]。垂直植被指数 PVI 能够消除土壤表面背景噪声的影响,增强植被信息。转换型土壤调整植被指数 TSAVI 是土壤调整植被指数 SAVI 的转换形式,能显

表 2 C 因子与波段组合或植被指数关系式列表

波段组合或植被指数 Image bands combinations or vegetation indices	波函数或植被指数关系式 The relation equation between C factor and image bands combinations or vegetation indices	遥感数据源 Remote sensing data sources	研究区域 Study area	文献来源 References
垂直植被指数 PVI (Perpendicular Vegetation Index)	$C = 1.005 \exp[-0.426(PVI+0.012)]$	Landsat-7 ETM+	爪哇岛 Cidamau 流域	[46]
增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index)	$C = \exp(-7.29EVI)$	MODIS	突尼斯中北部	[48]
转换型土壤调整植被指数 TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)	1999 年: $C = 1.012 \exp(-6.296TSAVI)$ 2005 年: $C = 1.002 \exp(-4.309TSAVI)$ 2007 年: $C = 1.013 \exp(-4.925TSAVI)$	Landsat TM, ETM+	突尼斯 Batta 流域	[47]
归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$C = 0.227 \exp(-7.337NDVI)$	Landsat TM	泰国 Nam Chun 流域	[51]
归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = -48.01C + 159.75$	Landsat TM	法国南部	[6]
band2, band3, band7 (TM 影像相应波段的反射率) 修改型土壤调整植被指数 MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)	所有植被类型: $C = 0.002(\text{band2}) - 0.043$ 栎树: $C = 0.0003(\text{band7}) + 0.004$ 栎树班克松混交: $C = 0.0003(\text{band7}) + 0.001$ 班克松: $C = 0.001(\text{band3}) - 0.004$ 种植园: $C = 0.0003(\text{band3}) + 0.002$ 灌木: $C = 0.001(\text{band7}) - 0.017$ 混合植被: $C = -0.055(\text{MSAVI}) + 0.052$ 草地: $C = -0.151(\text{MSAVI}) + 0.1$	Landsat TM	美国怀俄明州和威斯康星州两个军事训练区	[50]
归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = 0.4488C^{-0.0469}$	Landsat ETM+	菲律宾 Lamesa 流域	[7]
线性回归模型 草地: $C = 0.0369 + 0.0008b_1 - 0.0021b_2 + 0.0015b_3 + 0.0002b_4 - 0.0007b_5 + 0.0007b_7$ 灌木: $C = 0.0711 - 0.0034b_5 + 0.0071b_7$ 林地: $C = 0.0766 - 0.0014b_1 + 0.0030b_2 - 0.0017b_3 - 0.0006b_4 + 0.0003b_5 + 0.0010b_7$ 混合植被: $C = -0.1249 + 0.0051b_1 - 0.0024b_2 - 0.0028b_3 - 0.0014b_4 - 0.0011b_5 + 0.0036b_7$				
$b_1 - b_7$ 代表 band1-band7 (TM 影像相应波段的反射率)	对数-线性回归模型 草地: $\log C = -2.8681 + 0.0064b_1 - 0.0370b_2 + 0.0312b_3 + 0.0032b_4 - 0.0130b_5 + 0.0117b_7$ 灌木: $\log C = -1.3371 - 0.1035b_5 + 0.1912b_7$ 林地: $\log C = -1.2107 - 0.0505b_1 + 0.0922b_2 - 0.0425b_3 - 0.0377b_4 + 0.0191b_5 + 0.0169b_7$ 混合植被: $\log C = -8.7998 + 0.1324b_1 - 0.1310b_2 - 0.0595b_3 - 0.0127b_4 + 0.0039b_5 + 0.0543b_7$	Landsat TM	美国德克萨斯州胡德堡	[49]

著降低稀疏植被区土壤背景的影响。可见,根据研究区植被特点选择合适的植被指数能改善 C 因子估计,但以上植被指数无法评估作物残茬等地表枯落物。NDSVI、NDTI、NDI5、NDI7 等衰败植被指数可以反映林下枯枝落叶层信息,Wen 等^[53]引入冬季影像的衰败植被指数表示枯落层,与绿度指数(NDVI 等)联合估算结构化植被指数,结构化植被指数能够更准确表达植被的减蚀作用;结构化植被指数是对不同群落层次植被盖度的加权求和,属盖度含义,仍然需要依赖他人建立的 C 因子与盖度关系式计算 C 值。作物残茬光谱在接近 2100 nm 具有明显吸收特征,基于高光谱数据的纤维素吸收指数 CAI 与作物残茬覆盖度线性相关^[54]。微波数据也可以反映作物残茬覆盖^[55]。将衰败植被指数、高光谱数据和微波数据应用于流域、区域尺度 C 因子估算中有望能更合理的反映枯枝落叶层的减蚀作用,但目前还未见此类报道。

3.4 基于光谱混合分析(SMA)的 C 因子估算

中低分辨率遥感图像中的像元大多是包含几种植被类型的混合像元,在景观破碎化或地形复杂区域尤为普遍,这对于通过土地利用分类或利用植被指数估算 C 因子不利。光谱混合分析法认为图像中的一个像元可能由多个组分构成,每个组分对遥感传感器所观测到的信息都有贡献,因此可对混合像元进行分解。混合像元分解模型主要有线性模型、概率模型、几何光学模型、随机模型、模糊分析模型。线性模型假设像元的反射率为其端元组分反射率的线性组合。

地表覆盖越高,土壤侵蚀量越少,地表越裸露,土壤侵蚀量越大。基于这个思想,Lu 等^[56]利用 ETM 影像光谱混合分析,将地表分为土壤、绿色植被、阴影 3 个组分,建立 C 因子估算公式:

$$C = F_{bs} / (1 + F_{veg} + F_{shade} + F_{veg} \cdot F_{shade}) \quad (1)$$

式中, F_{bs} 、 F_{veg} 、 F_{shade} 分别代表裸土、绿色植被、阴影的盖度。类似的,De Asis 和 Omasa^[7]通过线性光谱混合模型提取裸土、植被、非光合物质(枯落物、砾石等)盖度:

$$C = F_{bs} / (1 + F_{veg} + F_{NPM}) \quad (2)$$

式中, F_{bs} 、 F_{veg} 、 F_{NPM} 分别代表裸土、植被、非光合物质的盖度,该式计算的 C 值在 0—1 之间。作者对比了(2)式得到的 C 因子与通过 NDVI 提取的 C 因子(作

者建立了 NDVI 与 C 因子的关系式,表 2),混合像元分析法得到的 C 因子提供了更详细的空间变异信息,输入 RUSLE 模型得到更准确的土壤侵蚀预测结果。

相对于通过 NDVI 等植被指数提取 C 因子,线性光谱混合分析法具有如下优势:不受土壤背景影响;考虑了地表枯落物、砾石等对 C 因子的贡献;直接提取 C 因子值,不需要建立 C 因子与植被指数的关系。该方法的缺点是:(1)端元组分数要小于影像波段数,因此地面分类数受限。(2)该方法假设到达遥感传感器的光子与唯一地物(即一个光谱端元组分)发生作用,而实际上多重散射是经常发生的。(3)当植被及枯落物完全覆盖地表时, $C=0$ (意味着预测的土壤侵蚀量为 0),但是即使是未受干扰的林地,具有完全的林冠和枯枝落叶层覆盖,仍然存在轻微的土壤侵蚀^[57]。

3.5 地理统计学方法结合遥感影像进行 C 因子插值

通过野外布设 C 因子实测样点,利用地理统计学空间插值技术可以得到 C 因子图,引入遥感影像信息作为辅助变量进行插值可以提高 C 因子估算精度。Wang 等^[49]通过协同克里金插值和序列高斯协同模拟进行 C 因子制图,首要变量是野外实测的 C 因子,辅助变量是与 C 因子相关系数最大的波段组合($band3+band7$)/ $band4$,结果表明辅助影像信息的序列高斯协同模拟得到最准确的 C 因子估计,协同克里金插值次之,两种方法得到 C 因子的精度均高于 C 因子与影像波段关系式法(表 2)。该研究通过 C 因子估计值与实测值的相关系数和均方根误差(RMSE)来表示 C 因子估计的准确性,这是衡量 C 因子图的全局准确性,未反映不同空间位置 C 因子空间变异。Gertner 等^[58]基于 TM 影像在相同地区通过多变量(冠层覆盖 GC、地面覆盖 CC、植被高度 VH)联合序列协同模拟进行无偏的 C 因子制图,通过多项式回归进行空间不确定性分析,量化了变量、变量之间交互作用、邻近像元对 C 因子变异的贡献。地理统计学方法的缺点是需要大量野外采样,尤其是景观破碎化地区,费时费力,难以广泛推广使用。

4 不同尺度 C 因子估算方法比较

以上共总结了 10 种 C 因子估算方法,不同方法

的适用尺度、应用范围不同,各有所长且存在各自的不足(表 3)。手册查询法简单快捷但应用范围有限;标准小区法依据 C 因子定义,但该方法应用过程中需要统一标准;次因子法依赖于对次因子及相关参数的实测或查询,增加野外实测会提高 C 因子计算准确性;USLE/RUSLE 方程反用法逻辑合理,但工作量大,其他因子的测定与计算误差会进入 C 因子估算结果中; C 因子与盖度关系式无论应用与小区、坡面、小流域尺度,还是应用于流域、区域尺度,均使 C 因子估算简单便捷,但该方法始终属于经验关系式,未反应植被减蚀作用机理,同时关系式的跨尺度

应用存在尺度效应问题,因此该方法准确性难以保证;土地利用/覆盖类型直接赋值法简单易行,但提取的 C 因子图精度较差;通过 C 因子与遥感影像波段组合或植被指数关系式提取的 C 因子图更精细,但遥感影像波段组合或植被指数反映的 C 因子信息不全面,往往忽略地表枯落层和浅层根系信息;光谱混合分析(SMA)能够全面反映 C 因子信息,但 SMA 方法本身存在一些缺点;地理统计学方法结合遥感影像进行 C 因子插值可获取精细的 C 因子图,并进行深入的空间统计分析,但工作量过大,应用困难。

表 3 不同尺度 C 因子估算方法比较

Table 3 Comparison of Cover-Management Factor (C factor) estimation methods at different scales

尺度 Scale	估算方法 Estimation methods	优缺点 Advantages and disadvantages	应用范围 Application area
小区、坡面、小流域尺度 Plot, hillslope and small watershed scales	手册查询法	简单快捷,准确性难以保证	应用范围有限,适用于 USLE、RUSLE 构建区域(美国,尤其是落基山脉以东地区)
	标准小区法	按 C 因子定义确定 C 值,USLE/RUSLE 的基础方法,但需要建设标准小区并长期监测	在标准小区一致、研究方法统一的前提下,可广泛使用
	次因子法	通过反映植被减蚀作用的 5 个次因子估算 C 值,不依赖标准小区,结果可靠,但测定参数较多,部分不易测定的参数往往依赖手册查询表	参数实测的前提下可以广泛应用
	USLE/RUSLE 方程反用法	通过土壤流失方程反求 C 因子,逻辑合理,但需要测定除 C 因子以外的其他因子,工作量大,尺度越大,越难应用	可广泛应用,但受工作量的限制
流域、区域尺度 Watershed, region scales	C 因子与盖度关系式法	只需测定植被盖度即可推算出 C 值,简单便捷,但盖度往往无法反映地表枯落物、浅层根系等对 C 因子的贡献,关系式在不同研究区的适用性不确定	一般适用于构建关系式所在的地区
	土地利用/覆盖类型直接赋值法	简单易行,但无法反映同一土地利用类型内 C 因子的时空异质性,受土地利用/覆盖类型解译的限制。	可广泛应用
	基于小区、坡面尺度 C 因子与植被盖度关系式估算流域、区域尺度 C 因子	简单便捷,但关系式的跨尺度应用需进行尺度效应分析与尺度转换研究	一般适用于构建关系式所在的地区
	通过遥感影像波段组合或植被指数估算 C 因子	确定的 C 因子图更精细,但大部分植被指数无法反映地表枯落物信息	可广泛应用
	基于光谱混合分析(SMA)的 C 因子估算	不依赖实测,直接提取 C 因子,不受土壤背景影响,考虑了地表枯落物、砾石等的贡献,但 SMA 方法本身存在一些限制	可广泛应用
	地理统计学方法结合遥感影像进行 C 因子插值	可获取精细的 C 因子图,能够反映不同空间位置 C 因子空间变异并进行不确定性分析,但工作量过大	可广泛应用,受工作量限制

5 结语

随着研究者对植被与管理措施减蚀作用认识的不断深入, C 因子从诞生开始就经历了一系列发展演变。小区、坡面、小流域尺度 C 因子估算所需研究场地和耗费时间不同, 研究人员可以根据研究区特点和研究精度要求选择合适方法。对我国来说, 虽然确定了大部分作物的 C 值, 构建了多种 C 因子与盖度关系式, 但是标准小区不统一, 使研究结论缺少可比性, 难以推广使用。

区域、流域尺度 C 因子合理估算及空间分布图制作是预测流域与区域土壤侵蚀的关键环节。土地利用/覆盖类型直接赋值法简单快速, 利用小区、坡面尺度建立的 C 因子与植被盖度关系式估算流域、区域尺度 C 因子是另一简便方法。通过建立植被指数与 C 因子关系式可以进行更精确的 C 因子估算, 但目前建立关系式使用的 NDVI 等植被指数无法表征地表枯枝落叶层。光谱混合分析(SMA)法可直接进行 C 因子估算, 考虑了地表枯落层、砾石的减蚀作用, 是目前最接近 C 因子含义的流域、区域尺度 C 因子提取方法。地理统计学方法与遥感影像结合可以提高 C 因子插值精度, 并能进行 C 因子变异来源分析。相对来说, 在流域、区域尺度进行 C 因子准确估算仍然是个难点, 这依赖于遥感技术与水土保持科学更充分的结合。

在 C 因子的估算研究中, 我国科学家尚需要加强如下方面工作: (1) 在标准小区一致的前提下, 详细测定地上地下各次因子参数, 建立不同植被类型 C 因子及次因子参数的查询表; (2) 综合考虑林冠层、灌木层、草本层、枯落物层的减蚀作用, 构建并筛选小区、坡面尺度 C 因子与植被盖度关系式, 比较 C 因子与植被盖度关系式在流域、区域尺度上的应用效果及影响因素, 揭示尺度效应并开展尺度转换研究; (3) 引入衰败植被指数、高光谱数据、微波数据表达枯枝落叶层信息, 与绿度指数相结合, 使遥感数据能够完全刻画 C 因子, 建立遥感数据与 C 因子关系式, 更准确的估算流域、区域尺度 C 因子。

References:

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains; Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.282. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1965: 10-36.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.537. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1978: 17-34.
- [3] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1997: 143-182.
- [4] Biesemans J, van Meirvenne M, Gabriels D. Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(1): 35-42.
- [5] Risse L M, Nearing M A, Laflen M L, Nicks A D. Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 825-833.
- [6] De Jong S M. Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modelling soil erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 1994, 19(2): 165-178.
- [7] De Asis A M, Omasa K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of Landsat ETM data. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62(4): 309-324.
- [8] Dissmeyer G E, Foster G R. Estimating the cover-management factor (C) in the Universal Soil Loss Equation for forest conditions. Journal of Soil and Water Conservation, 1981, 36(4): 235-240.
- [9] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation // Proceedings of 12th International Soil Conservation Organization Conference, Vol. III. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 21-25.
- [10] Zhang Y, Liu X C, Li Z G, Zhu Q K. Surveying soil erosion condition in Loess Plateau using soil erosion model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 165-171.
- [11] Spaeth K E, Pierson F B, Weltz M A, Blackburn W H. Evaluation of USLE and RUSLE estimated soil loss on rangeland. Journal of Range Management, 2003, 56(3): 234-246.
- [12] Gabriels D, Ghekiere G, Schiettecatte W, Rottiersa I. Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium. Soil and Tillage Research, 2003, 74(1): 47-53.
- [13] Lin S L, Huang Y, Nie Z G, Sun J H. Establishment of the soil loss equation for sloping farmland in low hill area of northern Liaoning Province. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(6): 251-253.

- [14] Jiang Z S, Wang Z Q, Liu Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the Loess Hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil Conservation*, 1996, 2(1): 2-9.
- [15] Tang Y, Dai S, Jiang G Y, Shi D M, Chen Z F. Calculation and analysis of the vegetation cover and management factor *c* value in slope farmland of Chongqing area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 53-59.
- [16] Yu D S, Shi X Z, Lü X X. *C* value of different land-use patterns and its assessment on sustainability in low hill red soil area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 71-76.
- [17] Zhang K L, Liu B Y, Cai Y M. The standard of unit plot in soil loss prediction of China. *Geographical Research*, 2000, 19(3): 297-302.
- [18] Zhang H M, Wang Q L, Dai L M, Guofan S, Tang L N, Wang S Z, Gu H Y. Quantifying soil erosion with GIS-based RUSLE under different forest management options in Jianchang Forest Farm. *Science in China: Series E Technological Sciences*, 2006, 49(S1): 160-166.
- [19] López-Vicente M, Navas A, Machín J. Identifying erosive periods by using RUSLE factors in mountain fields of the Central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(2): 523-535.
- [20] Milgroom J, Gómez J A, Soriano M A, Fereres E. From experimental research to an on-farm tool for participatory monitoring and evaluation; an assessment of soil erosion risk in organic olive orchards. *Land Degradation and Development*, 2007, 18(4): 397-411.
- [21] Fernández C, Vega J A, Vieira D C S. Assessing soil erosion after fire and rehabilitation treatments in nw Spain; performance of RUSLE and revised Morgan-Morgan-Finney models. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(1): 58-67.
- [22] Novara A, Gristina L, Saladino S S, Santoro A, Cerdà A. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 140-147.
- [23] Özhan S, Balcı A N, Özyuvaci N, Hızal A, Gökbulak F, Serengil Y. Cover and management factors for the Universal Soil-Loss Equation for forest ecosystems in the Marmara region, Turkey. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214(1/3): 118-123.
- [24] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, Majaliwa M J G, Woomeer P L. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 883-894.
- [25] Cinnirella S, Iovino F, Porto P, Ferro V. Anti-erosive effectiveness of Eucalyptus coppices through the cover management factor estimate. *Hydrological Processes*, 1998, 12(4): 635-649.
- [26] Liu B Y, Bi X G, Fu S H, Wei X, Li Y G, Duan S H, Yuan A P, Lu B J, Xie Y, Zhang W B, Ye Z H, Zeng X Q, Xu L. Beijing Soil Loss Equation. Beijing: Science Press, 2010: 72-77.
- [27] Bu Z H, Zhao H F, Liu S Q, Chen M H. Preliminary study on algorithm formula of vegetative factor for undisturbed areas in remote sensing monitoring soil loss. *Remote Sensing Technology and Application*, 1993, 8(4): 16-22.
- [28] Jin Z P, Shi P J, Hou F C, Zhao H X. The System Model and Governance Pattern of Soil Erosion in Hangfu River Watershed of Yellow River. Beijing: China Ocean Press, 1992: 69-73.
- [29] Liu B Z, Liu S H, Zheng S D. Soil conservation and coefficient of soil conservation of crops. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 32-36, 113-113.
- [30] Cai C F, Ding S W, Shi Z H, Huang L, Zhang G Y. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [31] Beskow S, Mello C R, Norton L D, Curi N, Viola M R, Avanzi J C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 2009, 79(1): 49-59.
- [32] Da Silva R M, Montenegro S M G L, Santos C A G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments; a case study of Tapacurú catchment. *Nat Hazards*, 2012, 62(3): 953-970.
- [33] Park S, Oh C, Jeon S, Jung H, Choi C. Soil erosion risk in Korean watersheds, assessed using the Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 263-273.
- [34] Ranzi R, Le T B, Rulli M C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology*, 2012, 422: 17-29.
- [35] Fu G B, Chen S L, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85(1/2): 38-49.
- [36] Cohen M J, Shepherd K D, Walsh M G. Empirical reformulation of the Universal Soil Loss Equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 235-252.
- [37] Zhu L, Huang J F, Li J. Application and result of soil erosion estimation method based on geographic information system and remote sensing technology. *Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences*, 2005, 31(4): 413-416.
- [38] Lü M Q, Wang J J, Jiang Q L, Zhang H, Hao X D. Temporal and spatial variability of soil erosion in Dongbeigou Watershed in northern mountainous area, Hebei Province, based on Land Use / Cover Change(LUCC). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 18-25.
- [39] Ji S H, Jiang M X, Yu X B. Evaluating soil erosion in Jiangxi Province with USLE model and remote sensing technology during 1995—2005. *China Environmental Science*, 2011, 31(7):

- 1197-1203.
- [40] Chen Y H, Pan W B, Cai Y B. Quantitative study of soil erosion in watershed based on RS, GIS and RUSLE-a case study of the Jixi Watershed in Fujian Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2007, 18(3): 5-10.
- [41] Feng L, Sun B P, Li J R, Zhao Y, Zhou X S. Application of GIS and USLE in evaluation of dynamic changes of soil erosion in areas of returning farmland to forest-A case study in Anding district, Dingxi City, Gansu province. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011, (11): 82-85, 89-89.
- [42] Ma C F, Ma J W, Buhe A. Quantitative assessment of vegetation coverage factor in USLE model using remote sensing data. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 6-9.
- [43] Yu R, Kang Q, Zhang Z X. Assessment of vegetation coverage factor in soil erosion model based on ASTER image interpretation. *Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 30(1): 113-117.
- [44] Pan M H, Wu Y Q, Ren F P, Dong F, Jiang Y. Estimating soil erosion in the Dongjiang river basin based on USLE. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [45] Wu X Q, Zhao H Y, Liu X D, Han B. Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 23-28.
- [46] Yoshino K, Ishioka Y. Guidelines for soil conservation towards integrated basin management for sustainable development: A new approach based on the assessment of soil loss risk using remote sensing and GIS. *Paddy and Water Environment*, 2005, 3(4): 235-247.
- [47] Kefi M, Yoshino K, Setiawan Y, Zayani K, Boufaroua M. Assessment of the effects of vegetation on soil erosion risk by water: a case of study of the Batta watershed in Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(3): 707-719.
- [48] Kefi M, Yoshino K, Setiawan Y. Assessment and mapping of soil erosion risk by water in Tunisia using time series MODIS data. *Paddy and Water Environment*, 2012, 10(1): 59-73.
- [49] Wang G, Wentz S, Gertner G Z, Anderson A. Improvement in mapping vegetation cover factor for the Universal Soil Loss Equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3649-3667.
- [50] Warren S D, Mitasova H, Hohmann M G, Landsberger S, Iskander F Y, Ruzicky T S, Senseman G M. Validation of a 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and sediment deposition. *Catena*, 2005, 64(2/3): 281-296.
- [51] Suriyaprasit M, Shrestha D P. Deriving land use and canopy cover factor from remote sensing and field data in inaccessible mountainous terrain for use in soil erosion modeling. The *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(partB7): 1747-1750.
- [52] Li H J, Zheng L, Lei Y P, Li C Q, Zhou K. Comparison of NDVI and EVI based on EOS/MODIS data. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 26-32.
- [53] Wen Z M, Brian G L, Jiao F, Lei W N, Shi H J. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. *Catena*, 2010, 83(1): 87-93.
- [54] Daughtry C S T, Hunt Jr E R. Mitigating the effects of soil and residue water contents on remotely sensed estimates of crop residue cover. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1647-1657.
- [55] McNairn H, Duguay C, Brisco B, Pultz T J. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(2): 308-320.
- [56] Lu D, Li G, Valladares G S, Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(5): 499-512.
- [57] Patric J H. Soil erosion in the eastern forest. *Journal of Forestry*, 1976, 74(10): 671-677.
- [58] Gertner G, Wang G, Fang S, Anderson A B. Mapping and uncertainty of predictions based on multiple primary variables from joint co-simulation with Landsat TM image and polynomial regression. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 498-510.

参考文献:

- [10] 张岩, 刘宪春, 李智广, 朱清科. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 165-171.
- [13] 林素兰, 黄毅, 聂振刚, 孙景华. 辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立. *土壤通报*, 1997, 28(6): 251-253.
- [14] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 2-9.
- [15] 唐寅, 代数, 将光毅, 史冬梅, 陈正发. 重庆市坡耕地植被覆盖与管理因子 C 值计算与分析. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 53-59.
- [16] 于东升, 史学正, 吕喜玺. 低丘红壤区不同土地利用方式的 C 值及可持续性评价. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 71-76.
- [17] 张科利, 刘宝元, 蔡永明. 土壤侵蚀预报研究中的标准小区问题论证. *地理研究*, 2000, 19(3): 297-302.
- [26] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 魏欣, 李永贵, 段淑怀, 袁爱萍, 陆炳军, 谢云, 章文波, 叶芝茵, 曾宪勤, 徐丽. *北京土壤流失方程*. 北京: 科学出版社, 2010: 72-77.
- [27] 卜兆宏, 赵宏夫, 刘绍清, 陈明华. 用于土壤流失量遥感监测的植被因子算式的初步研究. *遥感技术与应用*, 1993, 8(4): 16-22.
- [28] 金争平, 史培军, 侯福昌, 赵焕勋. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀

- 系统模型和治理模式. 北京: 海洋出版社, 1992: 69-73.
- [29] 刘秉正, 刘世海, 郑随定. 作物植被的保土作用及作用系数. 水土保持研究, 1999, 6(2): 32-36, 113-113.
- [30] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 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. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
- [37] 朱蕾, 黄敬峰, 李军. GIS 和 RS 支持下的土壤侵蚀模型应用研究. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(4): 413-416.
- [38] 吕明权, 王继军, 江青龙, 张怀, 郝晓东. 基于 LUCC 的冀北土石山区东北沟流域土壤侵蚀时空变化分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 18-25.
- [39] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 USLE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [40] 陈燕红, 潘文斌, 蔡芜缤. 基于 RS/GIS 和 RUSLE 的流域土壤侵蚀定量研究-以福建省吉溪流域为例. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(3): 5-10.
- [41] 冯磊, 孙保平, 李锦荣, 赵岩, 周湘山. 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. 湖南农业科学, 2011, (11): 82-85, 89-89.
- [42] 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. 水土保持通报, 2001, 21(4): 6-9.
- [43] 于嵘, 亢庆, 张增祥. 基于 ASTER 影像的土壤流失方程植被覆盖因子估计. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 113-117.
- [44] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 董帆, 江源. 基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [45] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 韩冰. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 23-28.
- [52] 李红军, 郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.