修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定

周 来，李艳洁，孙玉军

（省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京林业大学 林学院，北京 100083）

摘 要：[目的] 明确和规范修正的通用土壤流失方程(RUSLE)中各因子的单位，使得 RUSLE 在中国具体应用过程中更加科学和便捷。[方法] 通过对国内外 RUSLE 应用实践的总结和对比研究，并分析其科学合理性，找出最为普遍应用的、准确的 RUSLE 各因子的单位，明确不同单位类型之间的转化系数。[结果] 国内RUSLE的应用，大部分是通过各地区建立的各因子统计模型转换成国际制单位系统，最后相乘得到的是以国际制单位表示的土壤侵蚀量，另一部分则是通过相应的各因子统计模型计算得到各个因子以美制单位系统表示的计算结果，最后再乘以 224.2 将土壤侵蚀量转换为国际制单位。国内主流侵蚀估计中使用的单位焦耳系统，单位面积有两种即 km^2 和 hm^2。土壤流失量 A 常用的国际制单位为 t/hm^2 或 t/km^2；降雨侵蚀力因子 R 常用的国际制单位为 $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ 或 $(MJ \cdot mm)/(km^2 \cdot h \cdot a)$；土壤可蚀性因子 K 的常用国际制单位为 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ 或 $(t \cdot km^2 \cdot h)/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)$。不同地区建立的计算方法通过相应的转换系数转换成国际制单位。最后，R 和 K 因子的单位系统的一致性是RUSLE应用的关键步骤。[结论] R 和 K 因子通过相应的单位转换系数转换为国际制单位以及两者的单位一致性是土壤侵蚀评估的重要基础。

关键词：修正的通用土壤流失方程；RUSLE 因子；土壤侵蚀；单位确定

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)01-0169-06 **中图分类号**：S157

文献参数：周来，李艳洁，孙玉军. 修正的通用土壤流失方程中各因子单位的确定[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：169-174. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.030. Zhou Lai, Li Yanjie, Sun Yujun. Determination of units for various factors of revised universal soil loss equation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 169-174.

Determination of Units for Various Factors of Revised Universal Soil Loss Equation

ZHOU Lai, LI Yanjie, SUN Yujun

(*Key Laboratory for Silviculture and Conservation*, *Ministry of Education*, *College of Forestry*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: [Objective] To clarify and standardize the units of the revised universal soil loss equation (RUSLE), we aim to make RUSLE more useful in China. [Methods] By comparing the studies of RUSLE at home and abroad, we determined the most widely applied and accurate units of RUSLE factors and clarified the conversion coefficient between different units. [Results] The application of RUSLE in China, most of the statistical model established by regional units were converted to international units system by multiplying the conversion factor, and finally obtained the amount of soil erosion in international units. The others were the results of various factors represented by US units system through each factor of the corresponding statistical model calculation, the amount of soil erosion in the international system of units was obtained by multiplied by 224.2. The Joule unit system was widely used in the erosion estimation in China, and there were two area units, namely km^2 and hm^2. The unit of soil loss amount A was commonly used by international units as t/ha (t/hm^2) or t/km^2, the rainfall erosivity factor R was $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ or $(MJ \cdot mm)/(km^2 \cdot h \cdot a)$, the soil erodibility factor K was $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ or $(t \cdot km^2 \cdot h)/(km^2 \cdot MJ \cdot mm)$. The results of calculation methods established in different regions were converted into international units through

收稿日期：2017-06-11 **修回日期**：2017-07-18

资助项目：国家林业局 948 项目“基于 FORPLAN 的森林多功能经营技术引进”(2015-4-31)

第一作者：周来(1991—)，男(汉族)，河北省秦皇岛市人，硕士研究生，研究方向为森林资源监测与评价。E-mail：zhoulai807@126.com。

通讯作者：孙玉军(1963—)，男(汉族)，黑龙江省望奎县人，博士，教授，长期从事森林可持续经营理论与技术、森林资源监测与模型等领域的科学研究。E-mail：sunyj@bjfu.edu.cn。

the corresponding conversion coefficients. The consistency of the unit system of R and K factors was a critical step in the RUSLE application. [Conclusion] The conversion of R and K factors into international units through the corresponding unit conversion coefficient and the unit consistency of the two factors is the important basis for soil erosion assessment.

Keywords: revised universal soil loss equation; RUSLE factors; soil erosion; unit determination

土壤侵蚀是世界性环境问题,严重影响着人类生存环境的安全和社会经济的可持续发展[1]。定量估测土壤侵蚀的状况是治理土壤侵蚀的前提。评估土壤侵蚀的模型有基于物理过程的过程模型和经验模型,如修正土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)[2],农业面源模型(agricultural non-point-source pollution model, AGNPS)[3],改进的通用土壤流失方程(modified universal soil loss equation, MUSLE)[4]。由于基于物理过程的过程模型考虑了水运动的物理过程,因而能够更加准确的模拟土壤侵蚀的物理过程,估算结果的效果就优于经验模型。然而基于过程的模型对于输入数据的要求和计算过程很复杂,所以没能得到广泛应用,与之相反,经验模型具有简单实用的结构、对输入数据的要求低且能对土壤侵蚀情况进行很好的评估和预测,因而得到了广泛的应用,特别是在发展中国家[5-7]。在经验模型中,最流行的是美国农业部提出的通用土壤流失方程 USLE 和修正的通用土壤流失方程RUSLE。修正的通用土壤流失方程承袭了通用土壤流失方程的思想,对各因子的计算方法进行了改进。后来发展的许多其他的经验模型是依据它们的思想而改进或者提出的。在中国,修正的通用土壤流失方程被引进后得到了广泛应用,并于 2011 年经刘宝元等[8]改进提出了中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE)。然而通过对国内土壤侵蚀的研究发现,在土壤流失方程的应用过程中,对于其各因子的单位的应用存在不规范现象,若是单位不准确则会造成评估结果的极大不确定性,不利于科学技术的进步和科研结果顺利转化为生产力。国内对于此方面的整理的文章非常少,使得初学者对此会非常困惑,为此本文对修正的通用土壤流失方程的历史发展、各因子的意义和单位进行了适当的整理,旨在实现 RUSLE 的科学准确的应用。

1 修正的通用土壤流失方程

修正的通用土壤流失方程是对通用土壤流失方程的改进,土壤流失方程最早是美国农业部为治理农田土壤侵蚀而提出的侵蚀预测方程,最终预测在特定的土壤类型、降雨状况、地形及管理措施的情况下的年均土壤侵蚀速率。它也适用于施工场地和其他非农业用地,但不预测沉积和来自沟渠、河岸、河床冲刷的沉积物产量[9]。修正的土壤流失方程的计算公式为:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P \tag{1}$$

式中:A——土壤流失速率; R——年平均降雨侵蚀力; K——土壤可蚀性因子; LS——地形(坡长坡度)因子; C——植被覆盖—管理措施因子; P——水土保持措施因子。

2 方程中土壤流失速率和各因子的常见单位类型和相互转换

在该方程的推广和应用过程中,就曾经对其中各个量的值和单位进行过讨论,主要是美制单位和国际制单位之间的转换问题。Mithcell 等[10]认为直接设定单一转换因子以实现美制单位和国际单位的土壤流失速率的转换,但是这个做法无法解决使用国际单位的国家的该方程的各个因子的计算问题。Foster 等[11]给出了土壤流失速率和各个因子的单位换算系数,这使得使用各种不同单位的国家对于 RUSLE 经验方程的应用更加方便,其转换系数如表 1 所示。

通用土壤流失方程和修正的通用土壤流失方程最早起源于美国,所以最初的各因子的单位均是采用的美制单位,修正的通用土壤流失方程是对通用土壤流失方程各因子的计算方法的改进。后来修正的通用土壤流失方程在世界各地尤其是发展中国家得到广泛应用。中国引进该方程后,对许多地区进行了土壤侵蚀评估,也相应的建立了许多相关的各种因子的统计模型,甚至有些直接把其他国家使用的统计模型直接应用于国内。对于该方程应用过程中的单位使用也存在差异,大部分是通过各地区建立的各因子统计模型以国际制单位系统表示,最后相乘得到的是以国际直单位表示的土壤侵蚀量[12-15]。而另一部分则是通过相应的各因子统计模型计算得到各个因子以美制单位系统表示的计算结果,最后再乘以 224.2 将土壤侵蚀量转换为国际制单位[16-17]。对于这 2 种方法的选择应根据本地区所建立的各因子计算方法所采用的单位体系进行计算,不能为了追求使用美制单位而采用没有经过适用性验证的其他地区的计算方法。

表 1　土壤流失速率和各因子由美制单位转换成国际制单位的转换系数

因子	单位系统		单位换算系数(c)
	美制单位	国际单位	国际单位(SI)＝美制单位(US)×c
雨强(i 或 I)	$\frac{\text{inch}}{\text{hour}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{h}}$	25.400 0
单位面积降雨能量	$\frac{\text{foot}\cdot\text{tonf}}{\text{acre}\cdot\text{inch}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{hm}^2\cdot\text{mm}}$	0.263 8
降雨能量(E)	$\frac{\text{foot}\cdot\text{tonf}}{\text{acre}}$	$\frac{\text{MJ}}{\text{hm}^2}$	0.006 7
降雨侵蚀力(EI)	$\frac{\text{foot}\cdot\text{tonf}\cdot\text{inch}}{\text{acre}\cdot\text{hour}}$	$\frac{\text{MJ}\cdot\text{mm}}{\text{hm}^2\cdot\text{h}}$	0.170 2
降雨侵蚀力(EI)	$\frac{\text{hundreds of foot}\cdot\text{tonf}\cdot\text{inch}}{\text{acre}\cdot\text{hour}}$	$\frac{\text{MJ}\cdot\text{mm}}{\text{hm}^2\cdot\text{h}}$	17.020 0
年平均侵蚀力(R)	$\frac{\text{hundreds of foot}\cdot\text{tonf}\cdot\text{inch}}{\text{acre}\cdot\text{hour}\cdot\text{year}}$	$\frac{\text{MJ}\cdot\text{mm}}{\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{y}}$	17.020 0
土壤可蚀性因子(K)	$\frac{\text{ton}\cdot\text{acre}\cdot\text{hour}}{\text{hundreds of acre}\cdot\text{foot}\cdot\text{tonf}\cdot\text{inch}}$	$\frac{\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}}{\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm}}$	0.131 7
土壤流失量(A)	$\frac{\text{ton}}{\text{acre}}$	$\frac{\text{t}}{\text{hm}^2}$	2.242 0
土壤流失量(A)	$\frac{\text{ton}}{\text{acre}}$	$\frac{\text{t}}{\text{km}^2}$	0.224 2

注:① 美国年和小时可写作“hr”和“yr”,国际上写做“h”和“y”;② 1 ft·tonf×2.712×10^{-3}=1 MJ;③ 1 acre×0.407 1=1 hectare;④ 1 ha=1 hm^2;⑤ 1 hundreds of foot·tonf·inch=100 foot·tonf·inch;⑥ 由美制单位转换得到的国际单位的小数位数应该与之前的美制单位保持一致;⑦ 土壤流失量的单位“ton/(acre·year)”的分母上的“year”通常省略不写,t/hm^2,kg/m^2 同理。

3　国内 R 和 K 因子的算法及其单位总结

在中国根据水利部的土壤侵蚀强度划分等级标准规定,土壤流失速率的单位是 t/(km^2·a)[18]。国内主流的土壤侵蚀估计中使用的单位焦耳系统,单位面积有 2 种即平方千米(km^2)和公顷(hm^2)。

3.1　国内 R 因子的计算方法及其单位

降雨侵蚀力因子(R)是指降雨导致土壤侵蚀的潜力的大小,是土壤侵蚀的动力因素。降雨侵蚀力的计算受区域影响,不同地区具有不同的降雨侵蚀力计算方法。国内不同地区的降雨侵蚀力的计算方法如表 2 所示(只列出了单位较为具有代表性的几个计算式)。

表 2　国内降雨侵蚀力因子(R)的计算

试用地区	计算公式	参数及单位	R 转换后单位	转换因子(c_1)
福建地区[19]	$R=\sum_{i=1}^{12}(-1.552\,7+0.179\,2P_i)$	月雨量 P_i/mm 年降雨侵蚀力 R/(Ft.T.In/A.h)		0.170 2
安徽大别山地区[20]	$R=\sum_{i=1}^{12}0.012\,5P_i^{1.629\,5}$	月雨量 P_i/mm 年降雨侵蚀力 R/(J·cm·m^{-2}·h^{-1}·a^{-1})		0.100 0
海河流域太行山区[21]	$R=1.215\,7\sum_{i=1}^{12}10^{\left\{1.5\times\lg\left[\frac{P_i^2}{P}\right]-0.818\,8\right\}}$	月雨量 P_i/mm 年雨量 P/mm 年降雨侵蚀力 R/((foot·tonf·inch)/(acre·hour))	(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1})	0.170 2
全 国[22]	$R_i=\lambda\sum_{j=1}^{k}D_i^W$	半月天数 k/天 第 i 个半月内的第 j 天的日雨量 D_i(mm) λ 和 W 为模型参数 第 i 个半月的降雨侵蚀力 R_i/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1}·a^{-1})		1.000 0

注:海河流域太行山区的研究未给出具体 R 单位,但从数量级、所得的最终结果推断其单位为美制单位(foot·tonf·inch·$acre^{-1}$·$hour^{-1}$)。

在利用修正的通用土壤侵蚀方程 RUSLE 或者其改进形式进行某个地区的土壤侵蚀状态评估过程中,降雨侵蚀力因子是关键因子之一。作为土壤侵蚀动力因子,降雨的侵蚀能力是无法忽视的,其大小将很大程度上影响土壤侵蚀状况。对于降雨侵蚀力的计算所需研究区降雨数据,尤其是较小区域的数据明

显不足,无论是记录的时间长度还是监测站点的空间密度。如在国内的某个县的土壤侵蚀状态评估中,所能获得的降雨数据大多是县气象站一个站点所记录的近几年的降雨数据。以福建省将乐县为例,将乐县气象局仅能提供近 1 a 的日将雨数据和近五年的月降雨数据。国内在中国气象数据网上能够下载将乐县周边的 4 个县的近 50 a 的月雨量数据,然而无论从气象站点数量还是监测精度上来说都是较差的。为此许多学者采取了空间差值的方法进行弥补,也有需许多学者直接将某个数值带入公式。

降雨数据的记录精度或者研究学者所能获得到的降雨资料的精度也不尽相同。每个地区的降雨侵蚀力因子的计算的公式选择也存在着问题。降雨侵蚀力计算公式的建立是个长期实地监测并进行统计分析建模的过程,许多地区尚未建立适合该地区的降雨侵蚀力计算公式,许多公式的推广应用还有待检验。降雨侵蚀力计算公式的选择不同对于降雨侵蚀力因子的最终计算值影响会很大,这是由于降雨侵蚀力计算公式是统计计算而来且不同地区存在很大差异的原因。因此找到适合研究区的降雨侵蚀力计算公式,并且获得适合该公式的降雨数据是成功计算降雨侵蚀力的重要前提。

因此应根据所能获得的降雨数据精度选择适合本地的降雨侵蚀力计算公式,进而明确计算所得降雨侵蚀力值的单位,本着公式内所有因子的单位系相一致的原则进行计算或转换。

3.2 国内 *K* 值的计算方法及其单位

土壤可蚀性因子 K 表示的是土壤被雨水侵蚀、搬运的难易程度的重要指标,是影响土壤侵蚀的土壤内在因素。土壤可蚀性因子的值是在单位降雨侵蚀力或动能下某种土壤和标准小区(22.13 m 长,9%的坡度)内连续清耕条件下的土壤的土壤流失速率的比值[23]。Willams 等[24]发展的 EPCI 模型是通过土壤的物理结构组成(及砂粒、粉粒、黏粒的百分含量(%)和有机质的含量来估算土壤的可蚀性因子,其计算方法如公式 2 所示。

$$K=\{0.2+0.3\exp[-0.025\ 6S_d(1-S_i/100)]\}\times[S_i/(Cl+S_i)]^{0.3}\times\{1.0-0.25C/[C+\exp(3.72-2.95C)]\}\times[1.0-0.7(1-S_d/100)]/\{1-S_d/100+\exp[-5.51+22.9(1-S_d/100)]\} \quad (2)$$

式中:K——土壤可蚀性因子[(t·hm²·h)/(MJ·hm²·mm)];S_d——砂粒含量(%);S_i——粉粒含量(%);C_l——黏粒含量(%);C——有机碳含量(%)

后人又据此提出了许多基于土壤理化性质的模型。由于通过野外取土带回实验室进行测定的方法费时费力,所以后人对不同土壤类型的 K 值采取直接赋值的方法[25-27]。本文以福建省将乐县的土壤类型为例进行说明(如表 3 所示)。

表 3 不同类型的土壤 *K* 值

(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)

土壤类型	*K* 值	
	美制单位	国际制单位
红 壤	0.224 2	0.029 527 14
红壤性土	0.227 0	0.029 895 90
黄 壤	0.228 0	0.030 027 60
黄红壤	0.230 3	0.030 330 51
黄壤性土	0.197 0	0.025 944 90
潜育水稻土	0.212 0	0.027 920 40
渗育水稻土	0.244 7	0.032 226 99
酸性粗骨土	0.254 9	0.033 570 33
酸性石质土	0.219 6	0.028 921 32
潴育水稻土	0.339 1	0.044 659 47

注:二单位转换系数(c_2)=0.131 7。

得到研究区内的土壤类型空间分布图、各土壤类型的 K 值,再利用 GIS 就可以得到我们所需要的 K 值图层,这种方法具有高效、节省人力和时间成本、结果可靠的优点。

土壤可蚀性因子的计算也同样重要,其单位的选择将直接影响土壤侵蚀量的计算准确性,它的单位的确定需要与降雨侵蚀力因子的单位系统保持一致。中国的土壤可蚀性因子 K 值的变化区间是 0.001~0.04(t·hm²·h)/(hm²·MJ·mm)[28]。对于所搜集到的土壤可蚀性因子的赋值的单位我们可以从其数量级来进行大致判断即中国的土壤可蚀性因子若采用国际制单位则其 K 值在 10^{-3}~10^{-2}之间。土壤可蚀性因子的计算数据来源可以是土壤普查的数据,剖面点的实地调查数据也可以是前人对该地区各类土壤的赋值数据,对于数据的选择应综合考虑研究区的大小、计算精度的需求、剖面点的空间分布以及工作量的大小等各种因素。对于中大尺度如全国、区域、省份的土壤侵蚀量计算宜利用土壤普查数据,而对于小尺度的如某个县的范围宜根据前人的研究成果对研究区内的各种土壤类型进行赋值或者分土壤类型和空间分布进行剖面采样带回实验室进行实际测量。

在 RUSLE 模型中,R 和 K 因子的单位的确定对于最后侵蚀状况的评估影响很大。R 和 K 的单位系统要保持一致,否则得出的土壤流失速率是没有任何意义的。对于不同单位系统的选择应根据研究区的范围大小而定,较大区域如全国或省大区域宜选用 t/(km²·a),反之选择 t/(hm²·a)。

4 结 论

4.1 总 结

修正的通用土壤流失方程 RUSLE 虽然属于经验性模型但在世界各地尤其是发展中国家得到了广泛的应用,逐渐发展和改进出的许多种形式的土壤侵蚀方程也大都基于它的思想。RUSLE 模型不仅形式简单(若干因子相乘的形式),还充分考虑了影响土壤侵蚀的降雨、土壤、地形、植被、水土保持措施等因素,使得定量化描述土壤侵蚀状况更为简洁有效。

为了实现 RUSLE 对土壤侵蚀的预估,各个国家和地区开展了相关数据的试验和监测。其中,降雨侵蚀力的估测由于各国家和地区的监测水平差别很大,所以建立的计算方法的精度也存在着很大的差别。各个国家和地区建立的降雨侵蚀力方程存在着区域局限性,许多未进行公式建立地区的土壤侵蚀估算存在着巨大的不确定性。某地区的公式的建立需要小区试验的观测和长期数据的积累,存在着一定的难度。土壤可蚀性因子的计算也需要较大的人力和财力,尤其是区域等大尺度、土壤种类丰富的地区。诸多限制因素的存在使得国内在各因子计算公式的选择时存在着一定的混乱。

4.2 展 望

修正的通用土壤流失方程 RUSLE 作为科学、简单的土壤侵蚀状况评估方法将继续得到推广和应用。未来对该方程的发展将是继续在其基础上进行不断的改进,并逐步发展适合各地区的土壤侵蚀方程。各地区的降雨侵蚀力公式的建立和各土壤类型的 K 值赋值或计算及其空间分布是准确使用通用土壤侵蚀方程的前提。

对于降雨侵蚀力因子的计算,进一步验证现有的降雨侵蚀力计算方法的地区适用性将是未来的发展方向之一。明确现有的降雨侵蚀力计算公式的适用范围,规范降雨侵蚀力因子的计算对于准确计算土壤侵蚀量具有重要意义。对于没有进行降雨侵蚀力计算公式的地区,应该建立适用于本地区的降雨侵蚀力计算公式。降雨侵蚀力公式的建立应该充分考虑该地区的降雨数据的监测精度,即若该地区仅能获得月降雨量数据那么宜建立月雨量模型,若可以获得该地区的日雨量模型,则应建立日雨量模型。若能建立该地区的日雨量和月雨量模型,将极大地方便不同研究学者的土壤侵蚀模拟工作。此外,对于侵蚀降雨的监测更加精细,包括对降雨数据的记录以及对不同季节、同一次侵蚀降水内的不同时段内的差异的研究将会是可选择的研究方向。对于土壤可蚀性因子的计算,进一步完善各地区范围内各类土壤的 K 值的赋值并提高其精度是今后的一个研究方向。明确各区域内的各土壤类型的 K 值赋值结合区域内的土壤类型的空间分布,将极大地降低土壤侵蚀量的工作量。

[参 考 文 献]

[1] 吴傲.土壤侵蚀对区域可持续发展影响研究[D].北京:北京大学,2014.

[2] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1991,46(1):30-33.

[3] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A non-point-source pollution model for evaluating agricultural Watersheds[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1989,44(2):168-173.

[4] Sadeghi S H R, Mizuyama T. Applicability of the modified universal soil loss equation for prediction of sediment yield in Khanmirza watershed, Iran[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2007, 52(5):1068-1075.

[5] Zhu Mingyong. Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment: A case study in the Danjiangkou Reservoir Region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(12):7899-7908.

[6] Perovic V, Životic 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.

[7] Mhangara P, Kakembo V, Lim K J. Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65(7):2087-2102.

[8] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[C]// Process of 12th ISCO Conference, Process of Erosion and its Environmental Effects(Ⅱ). Beijing: Tsinghua Press, 2002:21-25.

[9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [J]. USDA: Handbook, 1978.

[10] Mitchell J K, Bubenzer G D. Soil loss estimation[J]. John Wiley & Sons, 1980(1):17-62.

[11] Foster G R, Mccool D K, Renard K G, et al. Conversion of the universal soil loss equation to SI Metric Units[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1981,36(6):355-359.

[12] 肖洋,欧阳志云,徐卫华,等.基于 GIS 重庆土壤侵蚀及土壤保持分析[J].生态学报,2015,35(21):7130-7138.

[13] 孙禹,哈斯额尔敦,杜会石.基于 GIS 的东北黑土区土壤侵蚀模数计算[J].中国水土保持科学,2015,13(1):1-7.

[14] 陈龙,谢高地,裴厦,等.澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布[J].应用生态学报,2012,23(8):2249-2256.

[15] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.

[16] 任坤,梅琨,朱慧敏,等.基于 RUSLE 模型的珊溪水库流域土壤侵蚀定量估算[J].生态学杂志,2015,34(7):1950-1958.

[17] 傅水龙,梁娟珠,黄路平.基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估[J].水土保持通报,2016,36(1):196-200.

[18] Tang Qing, Xu Yong, Bennett S J, et al. Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: A case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(4):1715-1724.

[19] 周伏建,黄炎和.福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.

[20] 吴素业.安徽大别山区降雨侵蚀力指标的研究[J].中国水土保持,1992(2):32-33.

[21] 马志尊.应用卫星影象估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨[J].中国水土保持,1989(3):24-27.

[22] 伍育鹏,谢云,章文波.国内外降雨侵蚀力简易计算方法的比较[J].水土保持学报,2001,15(3):31-34.

[23] Wischmeier W H. Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1963,27(5):590-592.

[24] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact(calculator 2): User manual[J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4):206-207.

[25] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.

[26] 吕喜玺,沈荣明.土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J].水土保持学报,1992,6(1):63-70.

[27] 方纲清,阮伏水.福建省主要土壤可蚀性特征初探[J].亚热带水土保持,1997(2):19-23.

[28] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

(上接第 168 页)

[参 考 文 献]

[1] 严金明,夏方舟,李强.中国土地综合整治战略顶层设计[J].农业工程学报,2012,28(14):1-9.

[2] 张正峰,杨红,谷晓坤.土地整治对平原区及丘陵区田块利用的影响[J].农业工程学报,2013,29(3):1-8.

[3] 张凤荣,张迪,安萍莉.我国耕地后备资源供给量:从经济适宜性角度分析[J].中国土地,2002(10):14-17.

[4] 王静,杨小唤,蔡红艳,等.20 a 来中国占补耕地光温生产潜力时空特征[J].自然资源学报,2013,28(1):126-136.

[5] Muchová Z, Leitmanová M, Petrovic F. Possibilities of optimal land use as a consequence of lessons learned from land consolidation projects (Slovakia)[J]. Ecological Engineering, 2016,90:294-306.

[6] 张超,刘佳佳,陈英义,等.土地整治区田块空间形态变化遥感监测与评价[J].农业机械学报,2017,48(1):104-111.

[7] 展炜,何立恒,金晓斌,等.基于模糊综合评价的土地整理项目绩效评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(2):145-148.

[8] Mihara M. Effect of agricultural land consolidation on erosion processes in semi-mountainous paddy fields of Japan[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996,64(3):237-247.

[9] 刘勇,吴次芳,岳文泽,等.土地整理项目区的景观格局及其生态效应[J].生态学报,2008,28(5):2261-2269.

[10] 蔡琳亭,胡鑫,周维禄.三峡水库重庆库区移土培肥的效益分析:以云阳县为例[J].西南农业大学学报:社会科学版,2009,7(3):10-13.

[11] 徐良骥,许善文,严家平,等.基于粉煤灰基质充填覆土复垦的最佳覆土厚度[J].煤炭学报,2012,37(S2):485-488.

[12] Feng Quanzhou, Xu Hengli. Determination of the thickness and medium of covering soil for land reclamation [J]. Agricultural Science & Technology, 2009,10(4):183-188.

[13] 陈艳华,何佳.丘陵山区耕作层覆土需求优先度评价研究:以福建省光泽县为例[J].自然资源学报,2015,30(8):1414-1424.

[14] 曲衍波,张凤荣,郭力娜,等.北京市平谷区农村居民点整理类型与优先度评判[J].农业工程学报,2011,27(7):312-319.

[15] 姜钦杰,吴宇哲.浙江省沿海县市滩涂围垦开发利用优先度研究[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2009,9(1):51-55.

[16] 王东,陈英,杨润慈.黄土丘陵沟壑区耕地整治优先度及模式:以麦积区为例[J].资源科学,2017,39(2):231-239.

[17] 沈立宏,张超,桑玲玲,等.利用网格法确定县域农田整治优先度[J].农业工程学报,2012,28(18):241-247,296.

[18] 李克宇.基于主成分分析法的土地整治项目优先度评价研究[D].兰州:甘肃农业大学,2012.