

# 武夷山丘陵茶园红壤土壤可蚀性近似计算初探

杨辰丛海, 陈志强

(福建师范大学 地理科学学院, 福州 350107)

**摘 要:**土壤可蚀性是土壤侵蚀内动力因素,反映土壤对外营力作用的敏感性,但其定量化计算普遍存在参数复杂、计算过程繁琐的问题。为寻找近似计算  $K$  值的途径,分别使用沉降法及丘林法对武夷山市丘陵地区 32 组茶园红壤机械组成与有机质进行测定,对比 M 层(耕作层)、N 层(非耕作层)机械组成差异,以 EPIC 方程计算茶园红壤  $K$  值并分析变化规律,建立了并优化单个粒径数据与  $K$  值的近似方程。结果发现:(1) 丘陵茶园红壤以砂粒及黏粒为主,M 层 pH 值更低,N 层  $K$  值高于 M 层,更易被侵蚀;(2) 砂粒与  $K$  值有强负相关关系,粉粒与黏粒与  $K$  值有强正相关关系,有机碳与  $K$  值相关关系弱;(3) 通过线性、幂函数、二次多项式拟合形式,砂粒、粉粒与  $K$  值可建立拟合效果良好的近似方程,二次多项式对砂粒拟合效果较好,幂函数对粉粒拟合效果较好,黏粒拟合效果差。将两种方程联立,结合多元线性回归分析赋予权重,并通过平均绝对偏差多次迭代修正的方法,可降低拟合误差。

**关键词:**土壤侵蚀;土壤可蚀性  $K$  值;最小二乘法;茶园土壤;武夷山市

中图分类号:S157.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0021-07

## Preliminary Study on Approximate Calculation of Erodibility of Red Soil in Hilly Tea Garden of Wuyi Mountains

YANG Chenconghai, CHEN Zhiqiang

(School of Geography Fujian Normal University, Fuzhou 350107, China)

**Abstract:** Soil erodibility is an internal dynamic factor of soil erosion, which reflects the sensitivity of soil to external forces. However, the quantitative calculation of soil erodibility generally has the problems on complex parameters and complicated calculation process. In order to find a way to approximately calculate  $K$  value and let it convenient to calculate, the mechanical composition and organic matter of 32 groups of tea garden red soils in hilly area of Wuyishan City were determined by settlement method and Tyurin's method, respectively. The differences of soil mechanical composition between M layer (cultivated layer) and N layer (non cultivated layer) were compared. The  $K$  value of red soil in tea garden was calculated by EPIC equation and the variation pattern was analyzed. The approximate equation between single particle size data and  $K$  value was established and optimized. The results showed that: (1) the red soil in hilly tea garden was mainly composed of sand and clay, the pH value of M layer was lower, and the  $K$  value of N layer was higher than that of M layer, so N layer was easier to be eroded; (2) there was a strong negative correlation between sand content and  $K$  value, a strong positive correlation between contents of silt and clay and  $K$  value, and a weak correlation between organic carbon content and  $K$  value; (3) through linear, power function and quadratic polynomial fitting, the approximation equation of sand, silt and  $K$  value could be established with good fitting effect, quadratic polynomial had the better fitting effect for sand, power function had the better fitting effect for silt, and the poor fitting effect for clay particle. The fitting error could be reduced by combining the two equations, giving weight with multiple linear regression analysis, and iteratively correcting the mean absolute deviation.

**Keywords:** soil erosion;  $K$  value of soil erodibility; least square method; tea garden soil; Wuyishan City

收稿日期:2020-12-06

修回日期:2021-01-15

资助项目:福建省自然科学基金资助项目“南方稀土矿区芒箕克隆生长及吸收稀土响应刈割的生理机制”(2020J01143)

第一作者:杨辰丛海(2000—),男(畲族),福建宁德人,本科在读,研究方向为生态恢复与水土保持。E-mail:2870903623@qq.com

通信作者:陈志强(1978—),男,福建莆田人,博士,教授,主要从事资源环境与生态恢复研究。E-mail:soiltuqiang061@163.com

土壤侵蚀指土壤及其母质在外营力作用下被破坏、剥蚀、搬运及堆积的过程,是人类面临的最普遍、持续性最强的一种地质灾害<sup>[1]</sup>。持续的土壤侵蚀对社会经济发展、农业耕作发展及生态环境保护均会造成不利影响<sup>[2]</sup>。土壤可蚀性因子  $K$  值是土壤侵蚀的内营力因素,其反映土壤对外界外营力剥蚀与搬运的敏感性<sup>[3]</sup>,是土壤侵蚀模型中的重要参数,与土壤侵蚀严重程度呈正相关关系,其值越高则代表土壤抗冲刷能力越弱,被侵蚀的可能性越强<sup>[4]</sup>。分析土壤可蚀性,可准确进行水土流失预报,评价土地生产力<sup>[5]</sup>。

国内外土壤可蚀性因子研究始于 20 世纪 30 年代。Bouyoucos<sup>[6]</sup>、Middleton<sup>[7]</sup>等众多学者通过分析土壤粒径分布、化学组成、渗水率等因素提出不同角度土壤可蚀性量化方法。Wischmeier 等<sup>[8]</sup>通过人工降雨模拟侵蚀,选定土壤指标进行回归分析,得出土壤可蚀性因子经验计算方程。美国水土保持局提出的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)及其修正形式(RUSLE),广泛运用于水土流失预报<sup>[9]</sup>。1984 年 Williams 等<sup>[10]</sup>从土壤不同粒级机械组成百分比出发提出的土壤侵蚀—土地生产力可蚀性计算模型(Erosion-Productivity Impact Calculator, EPIC),因其测量的便捷性、可比性与量化,成为我国学者计算土壤可蚀性因子  $K$  值较为主流的方法之一。近年来, Farshad Kiani<sup>[11]</sup>、Selen Deviren<sup>[12]</sup>等对伊朗、土耳其等地区土壤进行研究,发现干旱区土壤  $K$  值影响因素往往更为复杂。在我国,杨玉盛等<sup>[13]</sup>将土壤分散特性、团粒结构特性等引入土壤可蚀性因素进行考虑;朱显谟<sup>[14]</sup>基于黄土高原特性,对当地土壤抗冲性与渗透性进行研究。基于土壤可蚀性量化研究方法,众多学者对中国不同地区土壤可蚀性开展了大量研究,研究成果颇丰。然而,现有土壤可蚀性因子计算存在计算过程繁琐,所需数据较多的缺憾。就相对简单且经典 EPIC 模型而言,方程内有砂粒、粉粒、黏粒及有机碳含量 4 种自变量,利用其计算可蚀性,需测定对应的 4 种参数,在实验室条件较差的情况下,测量相关参数特别是有机碳含量难度大,且若以常用的沉降法测量机械组成,要测得粒径细小的黏粒,需静置沉降等待约 7 h (20℃)<sup>[15]</sup>,时间成本较高。砂粒是土壤中粒径最大的部分,在野外通过干测法就可估算其大致百分比含量,且在实验室中,砂粒沉降仅需 1 min 左右,沉降速度快,远低于黏粒沉降时间。若针对某一特定地区土壤质地特点,建立相关拟合方程,通过某一粒级含量求出对应地区土壤可蚀性  $K$  值的近似值,将大大方便其计算及可蚀性的户外比较,节省时间成本。然

而,对通过土壤中某一粒级含量求取可蚀性  $K$  值近似值的研究尚属少见。

本文以福建省武夷山市为研究区域,利用 EPIC 公式量化计算武夷山丘陵地区典型茶园土壤可蚀性  $K$  值大小,并求取不同粒级土粒含量百分比与  $K$  值的相关关系,探讨拟合建立单变量近似方程以求出近似  $K$  值的途径,以期对武夷山市茶园红壤提供简便且较精确的  $K$  值计算方法,助力水土保持及土壤侵蚀研究工作的开展。

## 1 研究区概况

武夷山市隶属福建省南平市,位于闽赣交界部位,经纬度为北纬 27°27′—28°04′,东经 117°37′—118°19′。武夷山山脉平均海拔高度 1 000~1 100 m,地势起伏大<sup>[16]</sup>,随着海拔上升,土壤垂直分异明显,丘陵地区地带性土壤为红壤。区内属亚热带季风气候,夏季炎热多雨,冬季温和少雨,年均温约 18.9℃<sup>[17]</sup>,年降水量约 2 000 mm,相对湿度 85%。茶业是武夷山市支柱性产业,在其经济发展中具有不可替代的作用。2018 年,全市茶园面积达 98.6 km<sup>2</sup>,产值 21.12 亿元,涉茶人口达 8 万人,占全市人口的 34%<sup>[18]</sup>,武夷岩茶享誉全球,其中武夷大红袍更是中国十大名茶之一<sup>[19]</sup>。因森林覆盖率高,武夷山市土壤侵蚀现状尚不严重,土壤保持量高,但由于山地内部海拔高、部分地区植被覆盖度差、降水侵蚀性高及潜在的茶园土壤酸化等因素<sup>[20]</sup>,土壤可蚀性在部分地区较高,有发生严重水土流失的可能。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

本文土壤有关数据来源于 2020 年 10 月户外采集的武夷山星村、溪前、黄坑、黄溪口茶园红壤 16 个样点共 32 组土样数据,均位于海拔小于 500 m,即 250 m 左右的丘陵地区。按土样深度、剖面特征及耕作程度分为耕作层及非耕作层,耕作层长期受人类耕作活动影响,非耕作层受人类活动影响相对较小,在实际采样中,以是否可明显观察到植物根系作为划分耕作层与非耕作层的依据,可明显观察到根系为耕作层。采集耕作层土样 16 组,非耕作层土样 16 组,全部为红壤,是当地丘陵地区茶叶种植的代表性土壤。为方便表述,在下文中,以“M 层”指代耕作层,“N 层”指代非耕作层。

### 2.2 研究方法

2.2.1  $K$  值计算与拟合方法 本研究中,土壤机械组成由沉降法测定,pH 值采用电位法测定,土壤有

机碳含量以丘林法测定,见公式(1)。

$$C = \frac{OM}{1.72} \quad (1)$$

可蚀性因子  $K$  值计算采用 Williams 等<sup>[10]</sup> 在 EPIC 模型中提出的土壤侵蚀方程经验公式(2),粒径分级按美国农业部制分级法,0.05~2 mm 为砂粒(SAN),0.002~0.05 mm 为粉粒(SIL),0.002 mm 以下为黏粒(CLA)。

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1.0 - \frac{\text{SIL}}{100})] \} \{ \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \}^{0.3} \{ 1.0 - \frac{0.25C}{[C + \exp(3.75 - 2.95C)]} \} \{ 1.0 - \frac{0.7 \text{SNI}}{[\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SNI})]} \} \quad (2)$$

式中:SAN,SIL,CLA 及  $C$  分别代表砂粒、粉粒、黏粒及有机碳含量(%), $\text{SNI} = 1 - \text{SAN}/100$ 。据公式(2)计算得武夷山丘陵茶园红壤  $K$  值。

计算得  $K$  值后,将相关系数高、相关性较显著的粒级作为自变量, $K$  值作为因变量,采用最小二乘法作为基本拟合方法,导入 MATLAB 进行线性最小二乘直线拟合及非线性最小二乘曲线拟合。为防止拟合多项式次数过高而产生 rouge 现象,非线性最小二乘使用幂函数及二次多项式进行。

2.2.2 拟合效果衡量指标选取 通过最小二乘法拟合得到近似方程后,导入 SPSS 25 进行相关指标计算。本文选用拟合优度( $R^2$ )、显著度(sig)、均方根误差(root mean square error, RMSE)及平均相对误差(mean relative error, MRE)4 个指标以衡量拟合的合理性。其中,sig,RMSE 是基本合格性指标,反映拟合方程是否具有基本的可信度。显著度(sig)方面,通常认为其在 95%的置信区间下小于 0.05,则具有可信度。RMSE 表示拟合结果总体的离散程度,其值越高代表拟合数据越离散,在不同的预报区间偏差较大,易出现较极端的偏差。MRE 反映拟合结果与实际值偏差大小的百分比,其值越小代表预测数值越逼近实际数值,拟合效果越好,是考量近似方程能否逼近真实数值的重要指标,反映拟合方程是否优秀。本文将 MRE 作为衡量拟合效果的主要指标。MRE 具体计算方式如式(3)。

$$\text{MRE} = \sum \frac{(\frac{|(X_n - X_K)|}{X_K})}{n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $X_n$  为通过拟合方程所求  $K$  预测值; $X_K$  为由 EPIC 经验公式所求标准  $K$  值; $n$  为样本个数(下同)。

2.2.3 平均绝对偏差多次迭代修正 在求出初步拟合方程的基础上,若将一定的修正常数加入原方程对其进行修正,往往能使平均相对误差进一步下降,但

若采用穷举法“猜”得该常数,往往要耗费大量时间。本文采用多次迭代求取平均绝对偏差来求出该修正正常数值,对产生的拟合方程进行修正。其原理为通过相减的方式比较预报值与实际值,求得预报值与实际值的偏差大小,并对所有偏差值之和取平均数得到平均绝对偏差值,并重复迭代运行该计算过程,在 MRE 最小时取得理想修正常数,并将其加入原方程,使得拟合方程误差进一步缩小。其计算方法如下:

$$\theta_i = \frac{\sum (X_n - X_K)}{n} \quad (4)$$

式中: $\theta_i$  为平均绝对偏差。求出平均绝对偏差后,将其通过以下途径修正:

$$Y_{i+1}(X) = Y_i(X) + \theta_i \quad (5)$$

式中: $Y_{i+1}(X)$  为本轮修正所得函数; $Y_i(X)$  为上轮修正所得函数。

该修正步骤可以重复迭代进行(图 1)。该图中,  $\text{MRE}_i$  代表上一轮迭代的 MRE,  $\text{MRE}_{i+1}$  代表本轮迭代的结果。迭代重复进行至所纠正方程的 MRE 较上一轮方程更大为止,即若  $\text{MRE}_i < \text{MRE}_{i+1}$ , 则迭代过程进行至该轮停止。该轮的迭代过程称为迭代拐点,实际计算表明,若拐点之后继续进行迭代,则 MRE 不仅不会减小反而会增大,且过拐点后迭代轮数越多则误差越大,拐点前一次迭代所求所有平均绝对偏差之和为最优修正常数。迭代过程在“拐点”处停止,取“拐点”前一次方程所有求平均绝对偏差之和作为最优修正常数。

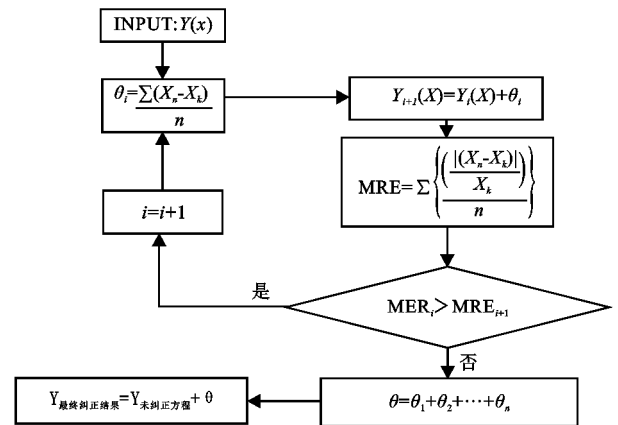


图 1 平均绝对偏差多次迭代修正流程示意图

## 3 结果与分析

### 3.1 不同深度土壤总体特征比较

据测量与计算结果(表 1),茶园红壤砂粒、粉粒、黏粒含量百分比分别为 43.5%,22.8%,33.7%,即茶园红壤整体上主要以砂粒为主,黏粒次之,粉粒最少,且集中于砂粒与黏粒,质地偏向于黏壤土;有机碳含量平均为 2.45%。据朱鹤健<sup>[21]</sup> 研究,武夷山受人工

影响少的自然山地土壤有机碳含量平均为 4.71%，茶园土壤有机碳含量显著低于自然山地土壤，这可能与茶园长期耕作导致的有机质流失有关。

对比 M,N 层,M 层砂粒、粉粒、黏粒 3 种粒级平均百分比分别为 45.4%,24.0%,30.6%,N 层为 41.6%,21.7%,36.8%,M 层砂粒含量更高,粒径相对更大,质地偏向于砂质黏壤土;N 层黏粒含量更高,粒径相对小。M 层有机碳含量平均为 3.41%,N 层为 1.38%,差异性显著(sig<0.05)。有机质更集中于 M 层,N 层有机质相对较少,其原因可能是 N 层深度相对深,日常耕作中施肥的有机肥类肥料难以深入到达,导致其有机质含量相对偏低。土壤可蚀性方面,M 层 K 值平均为 0.196,N 层为 0.215,两者存在明显差异(sig<0.05)。N 层 K 值较高,发生水土流失危险性更大,若 M 层受降雨等外力侵蚀而被剥离,则暴露的 N 层由于本身抗侵蚀性较弱,则更易发生严重的水土流失。

pH 值方面,平均 pH 值 M 层为 4.28,N 层为 4.62,两组数据存在显著差异(sig<0.05)。M 层土壤相对 N 层更酸,pH 值更低。其原因是铝离子为南方

红壤重要的酸性来源,茶本身对铝具有特殊的络合作用,并以枯枝落叶的形式将铝离子返还给土壤。N 层深度相对更深,距离表层有一定距离,铝离子下渗受到的土壤颗粒物阻碍,下渗量较低,到达 N 层的铝离子少,pH 值相对较高,M 层由于深度相对较浅,有较多的铝离子富集,因此 pH 值较低。

3.2 土壤颗粒粒径与土壤可蚀性 K 值相关关系比较

砂粒(SAN)与 K 值呈极显著负相关关系,相关系数为-0.819;粉粒(SIL)含量百分比与 K 值呈极显著正相关关系,相关系数达 0.812;砂粒含量与 K 的相关性略高于粉粒含量与 K 的相关性。黏粒(CLA)含量与 K 也有极显著的正相关性,相关系数低于砂粒与砂粒,为 0.579。有机碳(C)与 K 相关性不显著。

表 1 茶园红壤剖面粒径平均值及土壤可蚀性 K 值

剖面	SAN 砂粒/%	SIL 粉粒/%	CLA 黏粒/%	有机碳 C/%	pH	K
M 层平均值	45.4	24.0	30.6	3.41	4.28	0.196
N 层平均值	41.6	21.7	36.8	1.49	4.62	0.215
总体平均值	43.5	22.8	33.7	2.45	4.49	0.206

表 2 不同粒径土壤含量百分比与土壤可蚀性 K 值相关性(R)分析

项目	SAN 砂粒	SIL 粉粒	CLA 黏粒	C 有机碳
相关系数	-0.819	0.812	0.579	-0.271
	>0.539( <i>p</i> <0.001)极显著	>0.539( <i>p</i> <0.001)极显著	>0.539( <i>p</i> <0.001)极显著	<0.287( <i>p</i> >0.10)不显著

3.3 砂粒(SAN)、粉粒(SIL)与 K 值拟合方程建立

3.3.1 线性拟合及非线性拟合 R<sup>2</sup> 分析 舍弃相关系数低的有机碳数据,选择与 K 值相关性显著的砂粒、粉粒与黏粒进行曲线拟合。对 3 类曲线作函数图像(图 2)并求拟合优度(R<sup>2</sup>)(表 3)。总体上看,幂函数在针对粉粒(SIL)使用时其拟合优度最高,为 0.894,显著优于其他 8 种拟合方程。但在其他两种变量的拟合中,幂函数表现相对不佳。二次多项式在砂粒与黏粒的拟合中表现良好,为相应两种粒级的最优拟合方式,在粉粒拟合中也有较优秀的拟合优度。

在变量对比中,粉粒是 3 种变量中拟合优度 R<sup>2</sup> 最高的自变量,其平均拟合优度为 0.764,砂粒的平均 R<sup>2</sup> 为 0.523,黏粒为 0.346,粉粒的拟合优度显著高于砂粒与黏粒。在 3 种拟合形式中,黏粒的拟合优度表现均相对较差,这可能与其本身相关性相对较低有关。

3.3.2 拟合优度与信度分析 进一步舍弃拟合优度显著较低的 CLA 黏粒相关的拟合方程,将 SAN 砂粒、SIL 粉粒的 3 种拟合方程拟合得出的 K 值与标准 K 值使用 sig,RMSE,MRE 进行比较(表 4)。在显著度(sig)方面,除 SAN 一次以外,各个拟合结果的显著度在 95% 的置信区间,且显著性低于 0.03,达到 0.02 的置信区间,具有中度显著性。RMSE 中,SAN 幂函数的置信度较

差,高于 0.05,其余拟合方式置信度在 0.03 附近波动,平均值为 0.03,总体置信度较为良好,粉粒的拟合结果在 RMSE 方面较砂粒更优秀。

体现数值逼近程度的 MRE(%) 方面,各个方程相差较大。SIL 幂函数是绝对数值最逼近的拟合方程,其平均偏差为 10.840,较其他拟合方式优势较为明显。SAN 的 3 种拟合方式中,二次多项式误差较小且置信度较高。结合 sig,RMSE,MRE 及拟合优度 R<sup>2</sup> 对比结果,在 3 种不同拟合方式中,对于不同变量有不同的最优拟合方案,对砂粒而言,二次多项式为最优方式,而对粉粒而言最优方式则为幂函数。且在所有方程中,SIL 幂函数拟合为偏差最小的拟合方程。

3.4 武夷山茶园红壤可蚀性近似方程的优化

综合上文,最优拟合分别在 SAN 取多项式及 SIL 取幂函数时取得。对于砂粒(SAN),其最优拟合方程为  $y = -9E-06x^2 - 0.0013x + 0.2835$ ;对于粉粒(SIL),其最优拟合方程为  $y = 0.0457x^{-0.489}$ 。但两种方程仍与 K 值存在不可忽视的误差。联合两种拟合方程,先通过 SPSS 多元线性回归分析求出各个方程对 K 值影响程度的标准化系数β,并对其进行归一化处理得到影响权重系数,建立初步拟合方程,再

进一步使用平均绝对偏差多次迭代修正的方法对  $K$  值进行修正。根据各个单一变量方程的误差与置信度表现,选择 SIL 幂函数和 SAN 二次、SIL 幂函数与 SIL 二次多项式进行组合。

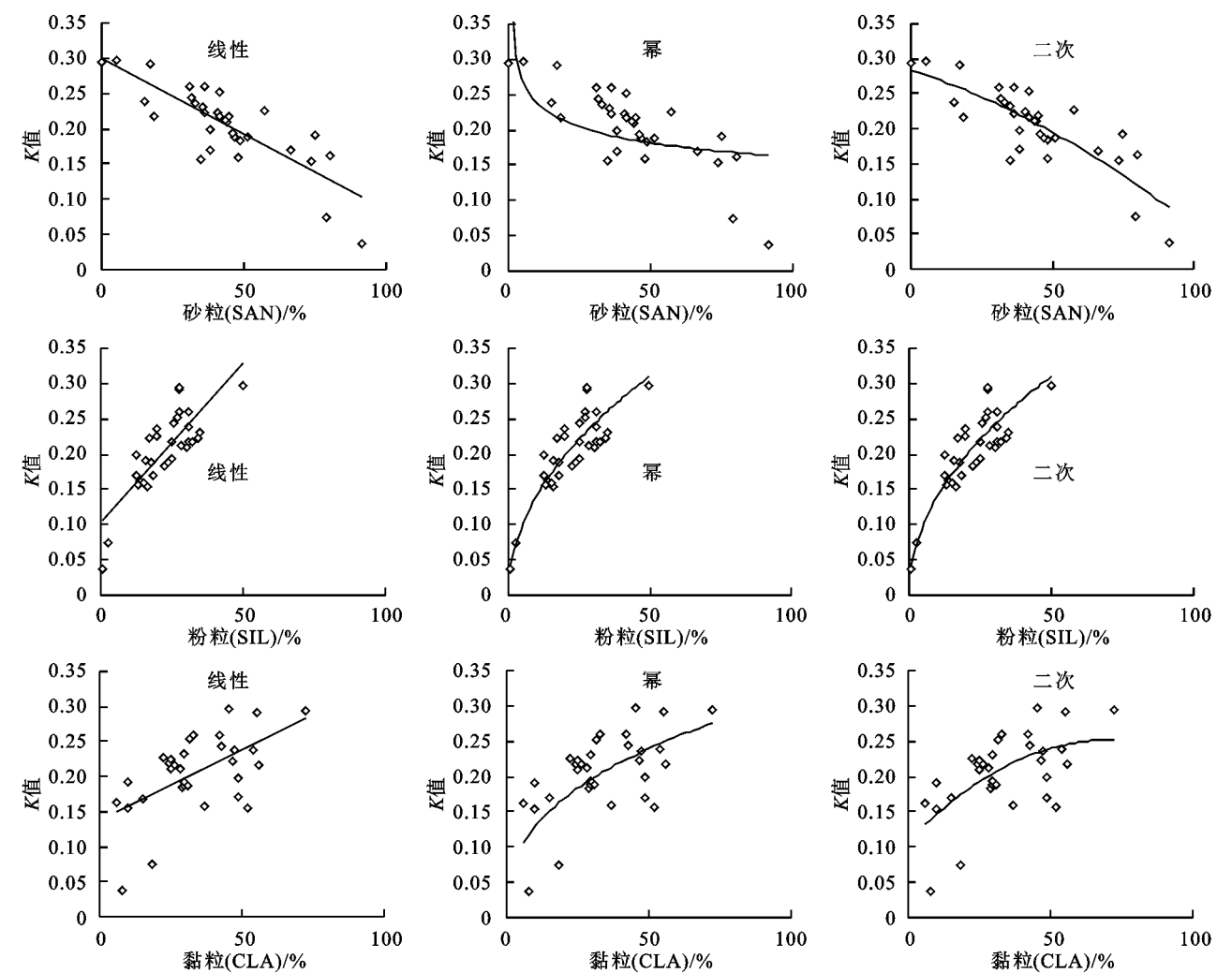


图 2 茶园红壤砂粒、粉粒、黏粒含量百分比与  $K$  值拟合结果

表 3 3 种函数拟合方程与拟合优度  $R^2$  分析

土壤颗粒	线性一次拟合	非线性幂函数拟合	非线性二次多项式拟合
SAN 砂粒	$y = -0.0022x + 0.2993 (R^2 = 0.672)$	$y = 0.3505x^{-0.167} (R^2 = 0.216)$	$y = -9E-06x^2 - 0.0013x + 0.2835 (R^2 = 0.682)$
SIL 粉粒	$y = -0.0046x + 0.1011 (R^2 = 0.660)$	$y = 0.0457x^{0.489} (R^2 = 0.894)$	$y = -0.0001x^2 + 0.0092x + 0.0565 (R^2 = 0.740)$
CLA 黏粒	$y = 0.002x + 0.138 (R^2 = 0.336)$	$y = 0.0536x^{0.3821} (R^2 = 0.343)$	$y = -3E-05x^2 - 0.004x + 0.1095 (R^2 = 0.361)$

表 4 各函数拟合效果各指标分析

项目	SAN	SAN	SAN	SIL	SIL	SIL
	一次	幂函数	二次	一次	幂函数	二次
sig	0.082	0.018	0.017	0.017	0.018	0.018
RMSE	0.031	0.052	0.031	0.032	0.028	0.028
MRE/%	17.649	27.367	16.872	17.510	10.840	12.857
$R^2$	0.672	0.216	0.682	0.660	0.894	0.740

以 SIL 幂函数结合 SAN 二次为例,先将单一变量方程所求  $K$  值与实际  $K$  值进行多元回归分析,求得各个方程对  $K$  值的贡献率,即标准化系数  $\beta$ :

$$\beta_{\text{SIL幂函数}} = 0.562 \quad \beta_{\text{SAN多项式}} = 0.416 \quad (6)$$

对其进行归一化处理,将其转化为方程权重系数:

$$\alpha_{\text{SIL幂函数}} = 0.575 \quad \alpha_{\text{SAN多项式}} = 0.425 \quad (7)$$

得未多次迭代修正原始方程  $K_1$ :

$$K_1 = 0.425(-9E-06x_1^2 - 0.0013x_1 + 0.2835) + 0.575 \times (0.0457x_2^{0.489}) \quad (8)$$

该方程在迭代五次后得到最优修正常数:

$$\theta_{K_1} = -0.0159 \quad (9)$$

得迭代修正方程:

$$K_2 = 0.425(-9E-06x_1^2 - 0.0013x_1 + 0.2835) + 0.575(0.0457x_2^{0.489}) - 0.0159 \quad (10)$$

式中: $x_1$  为砂粒(SAN)含量百分比(%); $x_2$  为粉粒(SIL)含量百分比(%); $K$  为土壤可蚀性因子(下同)。同理,对 SIL 幂函数结合 SIL 二次多项式进行

相同处理,得未修正方程  $K_3$ ;该方程最优修正常数在迭代三次后取得,进一步推得拟合方程  $K_4$ :

$$\alpha_{SIL \text{ 幂函数}}=0.777 \quad \alpha_{SIL \text{ 多项式}}=0.223 \tag{11}$$

$$K_3=0.223(-0.0001x_2^2+0.0092x_2+0.0565)+0.777(0.0457x_2^{0.489}) \tag{12}$$

$$\theta_{K_3}=-0.0077 \tag{13}$$

$$K_4=0.223(-0.0001x_2^2+0.0092x_2+0.0565)+0.777(0.0457x_2^{0.489})-0.0077 \tag{14}$$

各个方程拟合效果与单一变量方程对比见表 5。各个方程显著度 sig 都较优秀。实际运行证明,平均绝对误差多次迭代修正具有降低相对误差值的能力,但对于不同的拟合方程,其修正能力差别较大,若在“拐点”前迭代次数越多,则最终修正值绝对值越大,修正效果越好,MRE 降低的幅度也越高。且在实际运行中发现,若在拐点前迭代的轮数越高,则得到的单轮修正常数也越大,也越容易使迭代过程接近或超过拐点。对于 SIL 幂函数结合 SAN 二次而言,迭代过程运行了 5 轮,最终求得的修正常数绝对值也较大,且将 MRE 由 11.716 降为 9.673,误差下降 2.043,修正效果明显;但对于 SIL 幂函数结合 SIL 二次而言,其迭代轮数较低,只运行了 3 轮,修正效果相对较差,只将 MRE 由 11.064 降低为 10.606。另外,该修

正方法具有加剧数据离散程度的副作用,对于不同方程其加剧程度不同,如对于  $K_3$  而言,其将 RMSE 由 0.027 提升至 0.123,造成了较大的数值波动,但对于  $K_1$  而言,其副作用又相对较小,这可能与前期方程组合形式及权重系数的不同有关。

综合上文, $K_2$  的整体误差下降较多,预报精度提升较大,且其 MRE 值低于最优的单因子拟合方程 SIL 幂函数,较适合作为最终的拟合方程。该方程对于不同层次的土壤,预报精度差异也较大。对于 M 层,其 MRE 值为 7.542,对于 N 层则为 11.805,N 层显著高于 M 层。对于 M 层而言该方程 MRE 小于 10%,预报精度相对优秀,所以该方程较适合针对浅层土壤使用。

结合实际运用,单因素拟合方程中,SIL 幂函数拟合效果最好,误差小,但粉粒(SIL)在实际测量实践中往往是通过扣除砂粒与粉粒的百分比获得,实际运用较为不便;砂粒(SAN)在实际测量中较方便,但其拟合方程误差较高,预报值与实际值偏离较大,可能可以用于户外采样土壤 K 值的初步比较,单因素方程的运用潜力有待商榷。但若测得两种粒径百分比数据,使用双因素方程( $K_2$ ),则可获得较良好的预报效果,此时该方程的运用意义是略去了有机碳的测量,为缺乏试验条件的地区提供一定计算途径。

表 5 各拟合方程拟合效果对比

项目	SAN 二次	SIL 幂函数	SIL 二次	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
sig	0.017	0.018	0.018	0.017	0.017	0.018	0.022
RMSE	0.031	0.028	0.028	0.022	0.028	0.027	0.123
MRE	16.872	10.840	12.857	11.716	9.673	11.064	10.606

## 4 结论

(1) 武夷山丘陵茶园红壤粒级构成以砂粒及黏粒为主,粉粒含量较少,土壤质地偏向黏壤土,其中 M 层砂粒更多,N 层黏粒更多,N 层有机质较 M 层更少,N 层 pH 值较 M 层更高。非耕作层较耕作层更易被侵蚀,应尤其注重对非耕作层的保护。

(2) 该地丘陵茶园红壤砂粒含量百分比与 K 值呈极显著负相关关系,粉粒及黏粒含量百分比与 K 值呈极显著正相关关系,有机碳含量与 K 值相关性不显著。

(3) 砂粒、粉粒通过线性、幂函数与二次多项式 3 种拟合方式,可与 K 值建立较显著的拟合方程。综合评估 3 种拟合方式,不同变量条件下最优拟合方式不同,二次多项式对砂粒最优,幂函数对粉粒最优,且幂函数拟合效果 MRE 值显著较小,能较好贴合 K 值变化特征。粉粒拟合效果优于砂粒,黏粒的拟合效果相对较差。联系两种方程,通过二元线性回归计算赋予权重系数,并结合平均绝对误差多次迭代修正,

可进一步降低方程平均相对误差,使预报值更接近实际值。同时,本文所求拟合方程对 M 层的预报精度显著高于 N 层,较适合针对 M 层土壤使用。

(4) 根据不同单因素拟合方程对 K 值的贡献率,赋予不同的权重系数,并结合平均绝对误差多次迭代修正,可作为降低拟合方程误差的一种可能途径进行研究。

本研究受限于可获取的数据量与数据代表性,仅针对武夷山丘陵茶园这一特定地区提出特定方程拟合的可能可行方法,有一定局限性,拟合方程误差整体偏大,且对于平均绝对误差多次迭代修正的内在机制并未完全明晰。在后续研究中,可将从单一因子建立拟合方程求取近似值的思路运用至其他地区以推而广之,对平均绝对误差多次迭代修正的合理性与可行性及其内在机制进行进一步验证,并从统计数学角度采取其他方法进一步降低方程误差,以提高拟合精度。

### 参考文献:

[1] 史德明.如何正确理解有关水土保持术语的讨论[J].土

壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):3-5.

[2] 赵明松,李德成,张甘霖.1980—2010 年安徽省土壤侵蚀动态演变及预测[J].土壤,2016,48(3):588-596.

[3] 张永勤.武夷山山地土壤可蚀性 K 值的垂直分异及成因分析[J].亚热带水土保持,2012,24(3):19-22.

[4] 梁音,史学正.长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究[J].水土保持研究,1999,6(2):3-5.

[5] 张科利,蔡永明,刘宝元,等.黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J].生态学报,2001,21(10):1687-1695.

[6] Bouyoucos G J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. Journal of American Society of Agronomy, 1935,27(9):738-741.

[7] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion[J]. Usdsa. Technical Bulletin, 1930,178(16):119-121.

[8] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. Soil Society of American Proceeding, 1969,33(1):131-137.

[9] 魏慧,赵文武,王晶.土壤可蚀性研究述评[J].应用生态学报,2017,28(8):2749-2759.

[10] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new-method for assessing erosion's effect on soil productivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983,38(5):381-383.

[11] Kiani F, Ghezelseflo A. Evaluation of soil erodibility factor(k) for loess derived landforms of Kechik watershed in Golestan Province, North of Iran[J]. Journal of Mountain Science,2016,13(011):2028-2035.

[12] Saygin S, Basaran M, Ozcan A, et al. Land degradation assessment by geo-spatially modeling different soil erodibility equations in a semi-arid catchment[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2011,180(2):201-215.

[13] 杨玉盛,何宗明,陈光水,等.不同生物治理措施对赤红壤抗蚀性影响的研究[J].土壤学报,1999,36(04):528-535.

[14] 朱显谟.黄土区的土壤分布规律[J].科学通报,1957,8(15):477-478.

[15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.

[16] 陈健飞.武夷山土壤分类参比[J].土壤,1999,42(3):3-5.

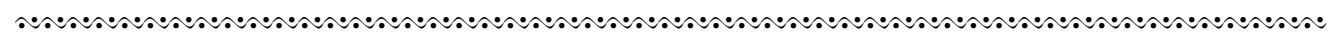
[17] 叶宏萌,李国平,郑茂钟,等.武夷山茶园土壤汞、镉和砷形态及茶叶有效性特征[J].热带作物学报,2016,37(11):2094-2099.

[18] 朱平.我国茶叶出口贸易现状及策略研究[J].福建茶叶,2020,42(9):50-51.

[19] 尧水根.中国十大名茶渊源考略[J].农业考古,2011,31(5):306-311,320.

[20] 龚溪.基于土地利用变化情景的武夷山市生态系统服务评估[D].南京:南京信息工程大学,2017.

[21] 朱鹤健.福建土壤与土地资源研究[M].北京:农业出版社,1994:36-43.



(上接第 20 页)

[8] 赵宏亮,侯立白,王萍,等.彰武农田土壤风蚀物垂直分布规律的研究[J].水土保持研究,2006,13(2):150-152.

[9] 王仁德,邹学勇,吴晓旭,等.半湿润区农田风蚀物垂直分布特征[J].水土保持学报,2009,23(5):39-43.

[10] 陈健,彭乾,常春平,等.旱作大田块风蚀物中有机质变化特征研究[J].河南农业科学,2011,40(8):120-124.

[11] 冷艳杰,赵相军,刘铁军,等.黑土地土壤风蚀特征参数及风蚀物分布规律研究[J].安徽农业科学,2013,41(33):12987-12990.

[12] 邹春霞,申向东,李彰俊.阴山北麓农牧交错带裸露耕地土壤风蚀物垂直分布规律[J].农业工程学报,2010,26(1):123-128.

[13] 王珊,李华,王华.埋土防寒区葡萄冬剪后挂枝的防风效果[J].农业工程学报,2015,31(12):206-212.

[14] 陈渠昌,江培福,雷廷武,等.利用 PAM 防治松散扰动沙土风蚀效果的风洞试验研究[J].农业工程学报,2006,22(10):7-11.

[15] 丁肇龙,汪君,胥鹏海,等.基于<sup>137</sup>Cs 的新疆淮东地区不同土地利用类型土壤风蚀特征研究[J].土壤,2018,50(2):398-403.

[16] Chepil W S. Dynamics of wind erosion:Initiation of soil movement by wind I [J]. Soil Structure. Soil Science, 1952,75:473-483.

[17] 董治宝,李振山.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):1-5,12.

[18] 孙传龙,张卓栋,邱倩倩,等.锡林格勒草地表层土壤粒度分形特征及其与风蚀的关系[J].中国沙漠,2017,37(5):978-985.

[19] 李晓丽,申向东,苏雅,等.裸露耕地土壤风蚀物化学组分的分布特征[J].农业工程学报,2012,28(5):114-119.

[20] 许明静,吕萍,肖南,等.毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响[J].中国沙漠,2020,40(4):71-80.

[21] Liu L Y, Shi P J, Zou X Y, et al. Short-term dynamics of wind erosion of three newly cultivated grass soils in Northern China[J]. Geoderma, 2003,115(1):55-64.

[22] 张春来,董光荣,董治宝,等.用风洞试验方法计算土壤风蚀量的时距问题[J].中国沙漠,1996,16(2):200-203.