

基于 RUSLE 模型因子的坡地土壤硝态氮地表径流流失经验公式

唐湘伟¹, 王全九^{1,2}, 陶汪海¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 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)

摘要: 为了方便有效地预测坡地土壤养分流失, 以硝态氮流失为研究对象, 根据大量国内外文献资料中的试验数据, 通过修正通用土壤流失方程, 研究分析硝态氮地表径流流失的特征和影响因素, 初步建立了坡地土壤硝态氮地表径流流失预测经验公式。结果表明: 硝态氮流失量与五大影响因子之间均呈幂函数正相关关系。利用相关资料对经验公式预测准确性进行检验得出, 硝态氮流失量预测值与实测值之间的相对误差为 30.28%, 模型确定性系数为 0.772, 模型计算结果与实测结果较为接近。因此, 通过分析影响因子与硝态氮流失量之间的定量关系, 所建立的硝态氮地表径流流失预测经验公式, 可用于不同条件下的坡地地表径流硝态氮流失量预测, 为坡地土壤硝态氮流失量预测分析和控制措施优化提供有效手段。

关键词: 地表径流; 养分流失; 经验模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0019-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.003

Empirical Formula for Estimating Nitrate Nitrogen Loss with Surface Runoff Based on RUSLE Model

TANG Xiangwei¹, WANG Quanjiu^{1,2}, TAO Wanghai¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To predict the amount of nitrate nitrogen loss efficiently, the characteristics and influencing factors of nitrate nitrogen in slope land were studied by analyzing literature data of simulated rainfall experiments. RUSLE model was used to estimate nitrate nitrogen loss. Based on quantitative analysis of influencing factors and loss of nitrate nitrogen, an empirical formula of nitrate nitrogen loss with surface runoff was established, and the accuracy of the formula was verified by literature experiment data. The results indicated that the values of R , erosive force of rainfall, ranged in $200 \sim 3\,220 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ and mainly distributed in $500 \sim 2\,100 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, R factor was a reflection of potential soil erosion caused by rainfall. Soil erodibility was an important index to evaluate soil sensitivity and was affected by soil properties, the values of soil erodibility factor K were distributed between 0.007 to 0.095 $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$. Vegetation cover and management factor could be easily controlled to alleviate soil erosion and nutrient loss, the values of C factor were distributed between 0.006 \sim 0.930. Water conservation measures was a limiting factor of soil and water conservation, the ranges of water conservation measures factor P were 0.08 \sim 0.81. The values of factor P in different conservation measures showed that engineering mode $<$ comprehensive mode $<$ cultivation mode $<$ grass mode. Hence, engineering mode was the most efficient measure to reduce soil and water loss. The amounts of nitrate nitrogen loss were positively related with each influencing factor, which could be described by power function. In order to verify the accuracy of the empirical formula, six rainfall events collected from the previous researches, which haven't been used in assessment of parameters. The relative error between calculated values and measured values of nitrate nitrogen loss amount with surface runoff was 30.28% and the model certainty coefficient was 0.772. The predicted formula developed in this study could

收稿日期: 2017-09-26

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51239009)

第一作者: 唐湘伟(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: 181862324@qq.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: wquanjiu@163.com

accurately predict nitrate nitrogen loss because of the calculated data concur with the measured data. Further, these findings provided a theoretical basis for predicting nitrate nitrogen loss and optimizing the control measures of prevent nitrate nitrogen loss from rainfall events.

Keywords: surface runoff; nutrient loss; empirical model

气候、土壤、地形、植被以及农业生产等条件造成大部分地区存在不同程度的水土养分流失。坡地水土养分流失不仅涉及农业问题,还关乎生态环境问题^[1]。严重的水土养分流失和土壤侵蚀会造成土壤氮素、磷素、钾素等流失,使土壤质量退化,进而影响土壤的生产能力,导致生态环境进一步恶化,是非点源污染的重要形式。土壤氮素中硝态氮极易发生淋失,是氮素流失的主要形态。土壤氮素流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程,降雨条件下表层土壤养分流失主要通过 3 种途径:一是土壤中的可溶性养分随径流流失;二是无机态溶质和有机质以吸附在土壤颗粒表面的形式随径流泥沙流失;三是径流携带的土壤养分垂直渗入深层土壤^[2]。养分流失模型是预测养分流失以及合理配置水土资源的有效工具,目前已有许多学者从不同角度提出了土壤养分流失预测模型,Crawford 等^[3]在 1973 年提出了地表径流养分迁移模拟模型;Ahuja^[4]通过数值法求解土壤养分迁移的对流弥散方程,进一步解释了养分在地表径流中的迁移过程;Walton 等^[5]根据混合深度质量平衡方程,建立了适用于溶解态养分的径流养分迁移模型;任理等^[6]考虑了土壤中硝态氮的转化作用,建立了硝态氮淋失的传递函数模型。国内学者所建立的土壤养分迁移数学模型^[7-9],为深入研究土壤养分随地表径流迁移提供了手段。不同的预测模型所采用的构建方法以及适用区域各异,计算得出的结果差异较大。目前国内外学者的研究大多侧重于流域泥沙的流失量预测,而对径流养分流失量预测的相关研究较少。坡地水土养分流失受到多种因素的影响,难以建立适合不同条件下的土壤养分流失通用的动力模型。因此,有必要开展流域内地表径流硝态氮流失的估算和预测研究,建立适合不同条件的坡地硝态氮地表径流流失预测经验模型。

1965 年美国农业部发布由 Wischmeier 等^[10-11]改进的通用土壤流失方程 USLE,并在 1992 年提出了修正版 RUSLE 模型^[12],对 USLE 因子的物理含义以及模型预测的精确性进行了完善。众多研究对 RUSLE 因子的计算、模型的区域应用等方面进行改进,使其在许多区域得到广泛应用,RUSLE 公式的发展为类似养分流失预测分析模型奠定了良好基础。因此,本文根据国内外学者的研究资料,利用 RU-

SLE 公式中所包含的影响因子,对降雨条件下的坡地土壤硝态氮流失特征进行研究,采用 RUSLE 模型的基本结构,构建硝态氮地表径流流失量计算经验公式,为坡地硝态氮流失预测分析提供有效方法。

1 坡地土壤硝态氮流失公式的建立

1.1 模型的基本结构

通用土壤流失方程是一个为了预报坡地土壤流失量而设计的侵蚀模型^[13]。通用土壤流失方程表示为:

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

式中: A 为年平均土壤流失量,主要指降雨及其径流作用下坡面发生侵蚀的多年平均土壤流失量($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为降雨侵蚀力因子($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$); K 为土壤可蚀性因子($(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$); LS 为地形因子,其中 L 为坡长因子, S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子; L 、 S 、 C 、 P 是无量纲因子。

借鉴土壤流失方程的基本形式,加入坡地土壤硝态氮流失预测传输系数 λ ,所建立的坡地硝态氮流失预测公式具体表示为:

$$E_{NO_3^- - N} = \lambda \cdot C_0 \cdot R^{a_1} \cdot K^{a_2} \cdot LS^{a_3} \cdot C^{a_4} \cdot P^{a_5} \quad (2)$$

式中: $E_{NO_3^- - N}$ 为养分流失量(kg/hm^2); λ 为坡地养分传输系数; C_0 为土壤养分初始浓度(g/kg); a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为经验指数,通过对试验数据进行统计分析获得。

1.2 模型参数计算

1.2.1 降雨侵蚀力因子 R 的计算 降雨侵蚀力因子反映了降雨过程中土壤侵蚀的潜在能力,并从定量的角度体现了降雨对土壤颗粒分离和运移的作用。由于所统计的降雨数据均来源于单次降雨下的试验资料,次降雨的降雨侵蚀力计算方法对降雨资料的完整性要求较高,因此采用 USLE 模型中次降雨侵蚀力的经典计算方法^[13]来计算 R 因子,公式为:

$$R = \sum EI_{30} \quad (3)$$

$$E = E_m \cdot P_m \quad (4)$$

$$E_m = 0.29(1 - 0.72 \exp^{-0.05 I_m}) \quad (5)$$

式中: R 为一次降雨的侵蚀力($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$); E 为一次降雨某时段降雨产生的动能(MJ/hm^2); I_{30} 为一次降雨过程中连续 30 min 最大降雨强度(mm/h); E_m 为一次降雨某时段单位面积上 1 mm

降雨产生的能量($\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$); P_m 为一次降雨过程中某时段的降雨量(mm); I_m 为次降雨过程中某时段内的降雨强度(mm/h)。

1.2.2 土壤可蚀性因子 K 的计算 土壤可蚀性因子是单位降雨侵蚀力引起的土壤流失率,反映了土壤性质及剖面特性对土壤流失量的影响。土壤可蚀性因子的大小与土壤质地相关,利用 EPIC^[14] 侵蚀—生产影响力模型中的 K 因子计算方法,计算公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95)} \right] \left[1 - \frac{0.7 \text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN1})} \right] \quad (6)$$

式中:SAN 为砂粒含量(%);SIL 为粉粒含量(%);CLA 为黏粒含量(%);C 为有机碳含量(%);其中 SN1 的计算公式为 $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

1.2.3 坡长与坡度因子 LS 的计算 坡长因子 L 是指在其他条件(坡向、坡度、降雨、土壤条件等)相同的情况下,单位面积上任意坡长的土壤流失量与标准坡长(22.13 m)土壤流失量之比。坡度因子 S 是指某一坡度小区单位面积上的土壤侵蚀量与标准坡度下(5.2°)的小区单位面积侵蚀量的比值^[15]。早期的 USLE 模型的研究资料主要来源于美国缓坡地观测,坡度一般小于 20° (约为 11.3°),因此提出的坡度因子计算公式往往仅适用于缓坡地。而我国水土保持监测技术规范下标准小区坡度为 15° ,标准坡度的选取对坡度因子值的计算与分析产生重要影响,因此兼顾国内外坡度因子的计算,本文采用 McCool 等^[15] 提出的 S 因子计算模型,此模型考虑到标准化坡度为 9° (约为 5.2°),计算公式为:

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \theta < 5.14^\circ \quad (7)$$

$$S = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{0.6}, \theta \geq 5.14^\circ \quad (8)$$

式中: θ 为坡度($^\circ$)。

L 因子的计算方法:

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (9)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (10)$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.0896) / (3 \times \sin \theta^{0.8} + 0.56) \quad (11)$$

式中: λ 为坡面长度(m); m 为坡长指数; β 为细沟与细沟间的比率。

1.2.4 植被覆盖与管理因子 C 的计算 植被覆盖与管理因子 C 指在相同条件下,有种植作物的地块上的土壤流失量与连续清耕地块的土壤流失量之比。针对植被覆盖的研究一般是通过在坡面径流观测场设置模拟小区和对照小区,试验实测获取不同植物的相关数据来研究不同植物生长期内 C 因子取值变化。当缺乏对照试验资料时,可通过实测地表植被覆盖度 c 来计算 C

值,本文采用蔡崇法等^[16] 提出的计算公式:

$$\begin{cases} C=1 & c=0 \\ C=0.6508-0.3436 \log c & 0 < c < 78.3\% \\ C=0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (12)$$

1.2.5 水土保持措施因子 P 的计算 水土保持措施因子 P 指在相同降雨、地形等条件下,有特定水土保持措施的标准小区与无实施水土保持措施的标准小区的土壤流失量比值,反映了水土保持措施对土壤侵蚀过程中的减小作用。本文根据 RUSLE 中水土保持措施因子的定义来计算 P 因子值,计算公式为:

$$P = \frac{A_P}{A_C} \quad (13)$$

式中: A_P 为实施某一水土保持措施的坡耕地土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); A_C 为无实施任何水土保持措施的坡耕地土壤流失量($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$)。

1.3 模型验证方法

为评价硝态氮地表径流流失计算公式及其参数的合理性,参照符素华等^[17] 在北京坡面径流流失方程构建中的模型验证方法,选用 Nash 等^[18] 于 1970 年提出的模型确定性系数 E_f 来评价养分流失方程预测结果的精度,该计算公式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{obs}} - E_{\text{cal}})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{\text{obs}} - \bar{E}_{\text{obs}})^2} \quad (14)$$

式中: E_{obs} 为实测硝态氮流失量(t/hm^2); E_{cal} 为计算硝态氮流失量(t/hm^2); \bar{E}_{obs} 为实测硝态氮流失量的平均值(t/hm^2); n 为总的预测和计算流失量个数。

在模型确定性系数 E_f 中,如果 E_f 为 1,表示模型计算结果与实测值非常接近; E_f 为 0 表示计算值与实测值之差的平方和等于实测值与平均值的平方和,这表明用实测值的平均值来进行流失量预测与模型预测的结果一致; E_f 为负则表示实测值的平均值比模型预测值能更好地进行流失量的估计。

2 硝态氮流失量计算相关数据来源

本文所收集的数据资料来自于 2000—2016 年间的 70 篇国内外坡地土壤水土养分流失相关文献,并将部分参考文献[19-42]列于文后。从文献中统计各地区次降雨条件下的降雨数据、地形数据、土壤数据、单位面积 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的流失量、土壤养分含量等信息,获取文献资料的基本信息见表 1。

3 结果与分析

3.1 影响因子与硝态氮地表径流流失量的相关关系

3.1.1 降雨侵蚀力因子 R 与硝态氮流失量的关系 降

雨条件下土壤中的可溶性养分随入渗水向土壤深处迁移,并且在地表产流时土壤中的养分向径流中传递。从图 1 可以看出,次降雨条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量与 R 因子呈正相关关系。当降雨强度较小时,降雨及径流对土壤的侵蚀能力较弱,随径流和泥沙流失的养分较少。随着降雨侵蚀力增加,薄层水流的紊

动随雨强的增大而加大,导致径流侵蚀的切应力增加,径流与土壤的作用强度增大,因此径流中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量增加,流失量增大。根据各地区的降雨数据计算得出 R 因子取值范围为 $200 \sim 3\,220$ $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,且主要集中分布在 $500 \sim 2\,100$ $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。

表 1 坡地养分流失文献资料基本信息

雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	文献 篇数	坡度/ ($^\circ$)	文献 篇数	坡长/ m	文献 篇数	试验 地区	文献 篇数
0.07~0.5	20	1.2~5	22	1~5	18	陕西	23
						四川	10
						重庆	5
0.5~1	18	5~10	17	5~10	22	湖南	4
						山西	4
						江苏	3
						浙江	2
1~1.5	15	10~15	14	10~15	18	甘肃	3
						新疆	3
						美国印第安纳州	4
1.5~2	12	15~20	13	15~20	8	乔治亚州	2
						加利福尼亚州	3
						明尼苏达州	1
2~2.5	5	20~30	4	20~25	4	印度	1
						澳大利亚	2

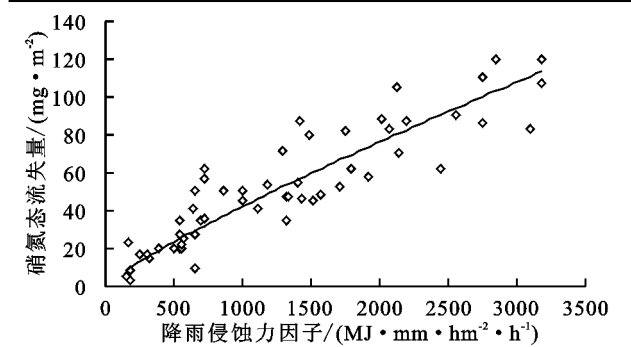


图 1 R 因子与硝态氮流失量变化的关系

3.1.2 土壤可蚀性因子 K 与硝态氮流失量的关系 土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀的敏感程度以及实施保护性耕作措施的重要指标。土壤可蚀性与土壤颗粒组成、土壤初始含水量、有机质含量、渗透率、黏土矿物的性质及化学成分等理化性质关系密切。除土壤理化性质等因素外,土壤可蚀性还受降雨特征和土地利用方式等外部因素的影响。从图 2 可以看出, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量随着 K 因子的增大呈递增趋势。土壤可蚀性反映了土壤在发生侵蚀过程中的抗蚀能力,其数值是土壤对侵蚀抵抗力的倒数, K 因子值越大,土壤抵抗侵蚀的能力越弱,土壤流失的比率越大,因而土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量有增加的趋势。根据公

式(6)计算得出,不同土壤类型的可蚀性因子 K 值变化为 $0.007 \sim 0.092$ $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$,且我国南方山区的黄壤、石灰土、南方丘陵区的红壤以及北方土石山区的褐土等为可蚀性值较小的土壤类型,而黄土高原地区的黄绵土和四川盆地的紫色土的土壤可蚀性值较大。

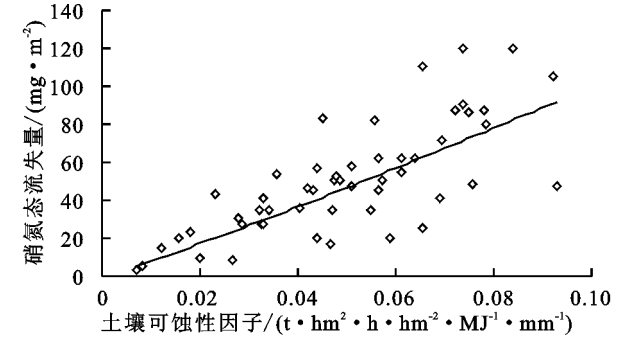


图 2 K 因子与硝态氮流失量变化的关系

3.1.3 地形因子 LS 与硝态氮流失量的关系 坡度、坡长是影响坡地土壤流失和土壤溶质迁移的重要物理量,坡度的变化会引起坡面承雨面积的改变,以致土壤表层承雨量发生变化,同时改变雨滴与土壤的接触角度及地表径流和土壤的平衡状态,对土壤入渗能力及坡面水流特性造成一定影响^[43]。坡长变化会引起土壤表层承雨面积和产流量的改变,进而影响到水

流形式以及雨滴的击溅侵蚀能力。坡度、坡长的差异影响了坡地土壤养分随径流的迁移过程,势必会影响溶解于径流或吸附于泥沙中的 NO_3^- -N 流失量。坡长因子 L 与坡度因子 S 的乘积即为坡形因子 LS , 计算获得的 LS 因子与单位面积硝态氮流失量的关系见图 3。从图 3 可以看出,随着 LS 因子增加, NO_3^- -N 流失量也随之增加。小坡度的坡面径流流速较小,对地表 NO_3^- -N 的冲刷、侵蚀作用相对较弱。 NO_3^- -N 的流失会随着坡度的增大而加剧,坡度增长到临界坡度之后,坡面实际承雨量会随着承雨面积的减小而降低,并且地表汇流时间缩短,地表径流与养分的作用时间减小,导致地表所流失的 NO_3^- -N 开始不断减少。 L 因子与坡长成正比,坡长越长,径流与土壤的接触时间越长, NO_3^- -N 随水分向深层土壤入渗的流失量增加。同时,承雨面积随着坡长的增大而增大,径流量和流速越大,随着径流迁移从出口断面流出的硝态氮总量也随之增加。

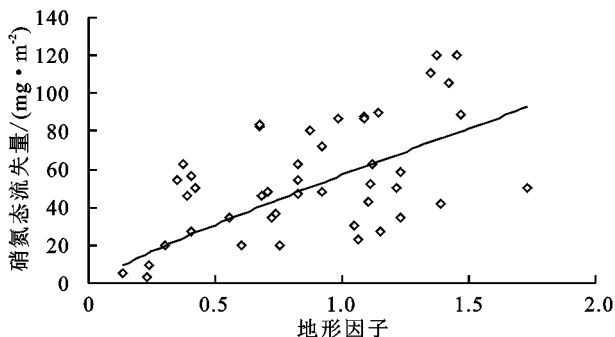


图3 LS 因子与硝态氮流失量变化的关系

3.1.4 植被覆盖与管理因子 C 与硝态氮流失量的关系 植被覆盖是重要的水土保持措施之一,植物的茎、叶部分能够部分削弱降雨动能,植物茎叶及枯枝落叶对径流流速有一定阻缓作用,植物根系对提高土壤抗冲抗蚀性能及渗透性等方面具有良好的影响^[44]。植被与作物覆盖措施在减弱坡面径流和土壤侵蚀的过程中还同时作用于随径流流失的养分。从图 4 可以看出, NO_3^- -N 流失量与 C 因子呈正相关关系。植被覆盖增加了地面粗糙度,植被也对径流起到一定拦截作用,使汇流速度减慢,降低径流对土壤 NO_3^- -N 的作用强度,从而削弱养分流失,因此良好的植被覆盖措施能够有效地减少径流养分的流失。基于统计资料中的植被覆盖度和实测土壤流失量计算得出 C 因子数值, C 因子与植被覆盖度 c 呈反比关系,植被覆盖度愈大,坡面径流硝态氮流失量越小,从而 C 因子值随 NO_3^- -N 流失量的增大而增大。根据各地区流域耕作管理制度以及土地利用现状,利用公式(12)确定各种土地利用类型的 C 因子值的变化

为 0.006~0.930,不同土地利用类型的 C 值排序为林地<草地<居民地<水田<旱地<裸地。

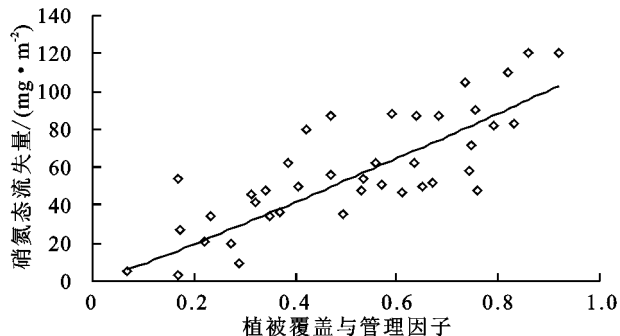


图4 C 因子与硝态氮流失量变化的关系

3.1.5 水土保持措施因子 P 与硝态氮流失量的关系 从图 5 可以看出,随着 P 因子的增大, NO_3^- -N 流失量不断增加。 P 因子反映了耕作措施、林草措施等对土壤流失的影响, P 值越小,土壤地表径流 NO_3^- -N 流失量越少,因此采取适当的水土保持措施对防治水土流失能起到积极的作用,从而有效降低土壤中氮素的流失。 P 因子还受到土壤性质、植被覆盖度等因素的影响,取值范围为 0.08~0.81,各地区的水土保持措施因子 P 值见表 2。在 RUSLE 模型中, P 值越小代表该区域实行水土保持防治措施越好或区域侵蚀程度越小, P 值越大则表示该区域所实行的防治措施效果越差。不同水土保持措施下的 P 值大小排序为:工程措施<耕作措施<综合措施<林草措施,说明工程措施减少水土流失效应最为显著。

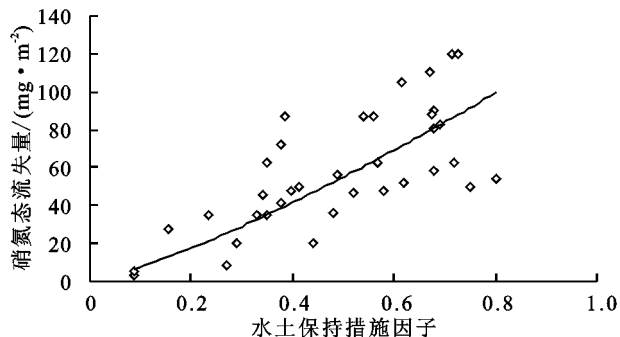


图5 P 因子与硝态氮流失量变化的关系

3.2 预报模型的建立

降雨条件下坡地硝态氮流失受到降雨特征、地形条件、土壤性质、土地管理措施等因素的影响。本文参考 RUSLE 公式的建构思路和相关参数确定方法,利用降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、作物覆盖与管理因子和水土保持措施因子综合体现硝态氮流失特征。依据五大因子与硝态氮径流流失量之间的关系分析,可以定量分析硝态氮径流流失量与影响因素之间的关系。应用单因子非线性回归的方法,分别得到土壤硝态氮流失模数与次降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、地形因子(LS)、植被覆盖与管理因子(C)以及水

土保持措施因子(P)之间的关系(表 3)。从表 3 可以看出,在次降雨过程中,土壤硝态氮流失模数与五大因子间存在较为明显的幂函数关系。各因子影响下的硝态氮流失量公式用均方根误差(RMSE)进行评价,由于试验资料基数较大,对数据偏离程度产生影响。通过

SPSS 软件进行方差单因素分析得到, LS 因子、 P 因子与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量之间的差异性显著($p < 0.05$),说明地形条件、水土保持措施对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量的影响较为显著,因此可以通过控制地形条件、优化水土保持措施等对硝态氮的流失进行调控。

表 2 坡耕地不同水土保持措施因子 P 值

措施分类	措施类型	P 值	措施分类	措施类型	P 值
耕作措施	免耕	0.16~0.29	林草措施	牛鞭草	0.71
	横坡耕作	0.53~0.69		牧草	0.50~0.61
	等高植物篱	0.512		水土保持林	0.45~0.53
	苜蓿植物篱	0.564		经果林	0.575
	梯田	0.08~0.19		人工补植地	0.612
工程措施	地埂	0.23	综合措施	生物防冲带	0.525
	截流沟	0.18~0.30		封禁地	0.638

表 3 土壤硝态氮流失量与各影响因子之间的关系

影响因子	回归方程	决定系数	均方根误差	显著性分析
R	$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 0.12R^{0.85}$	0.79	13.29	NS
K	$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 1243.9K^{1.1}$	0.68	16.33	NS
LS	$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 56.89(LS)^{0.9}$	0.46	20.55	0.018*
C	$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 112.65C^{1.1}$	0.63	15.06	NS
P	$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 131.49P^{1.25}$	0.71	18.51	0.034*

注: * 表示试验因素与结果存在显著差异性($p < 0.05$); NS 表示试验因素与结果间差异不显著。

根据表 3 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量与单因子间的关系表达式,将各因子参数相乘,并通过曲线拟合获取修正系数 λ 值,得出各种土地利用类型或地形的硝态氮流失量。结合公式(2)所提出的公式基本框架,所建立的硝态氮流失量预测公式为:

$$E_{\text{NO}_3^- - \text{N}} = 6.55 \times 10^{-2} C_0 \cdot R^{0.85} \cdot K^{1.1} \cdot (LS)^{0.9} \cdot C^{1.1} \cdot P^{1.25} (R^2 = 0.61, \text{RMSE} = 16.24, n = 68)$$

(15)

公式(15)是在总结国内外关于坡地土壤养分流失试验资料的基础上建立的经验模型,其基本参数均通过文献资料提供的试验数据获得。

3.3 坡面土壤硝态氮流失模型准确性评价

为了获得具有普遍应用价值的土壤硝态氮径流流失计算公式,在公式建构方面采用了通用土壤流失方程基本构架,并利用国内外学者研究获得的数据进行模型参数的推求。为进一步分析公式计算的准确性,本文选取了未被用于参数推求的 6 个小区^[45-47]的观测数据为实测流失量,采用本文模型计算结果作为预测值,以此分析硝态氮流失方程中预测结果与参数的合理性。各小区预测公式的参数计算见表 4。根据表 4 和土壤硝态氮径流流失计算公式,获得各小区硝态氮径流流失量。各小区实测 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量与

计算流失量对比结果见表 5 和图 6。图 6 为根据表 5 绘制的实测值与预测值间的 1:1 线分布图,从图 6 可以看出,公式计算的预测 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量和实测 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量分布在 1:1 线两侧,且数据点在 1:1 线两侧波动较小,说明土壤硝态氮流失量的实测值与计算值之间具有良好的对应关系,公式计算结果与实际流失量间存在一致性变化趋势。从表 5 可以得出, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量计算值与实测值之间的平均相对误差为 30.28%,由于参数确定所用资料来自世界各地,自然条件变异较大,导致相对误差较大。在表 5 的基础上采用公式(14)计算出预测值与实测值之间的模型确定性系数 E_f 为 0.772,说明模型计算结果与实测结果较为接近。通过对模型数据及实测数据进行误差分析,得出所建立的硝态氮流失方程参数取值较为合理,此公式在一定误差范围内能够预测地表径流硝态氮的流失,可以用于不同地区的土壤硝态氮径流流失预报评价和控制措施的对比分析。

表 4 各小区参数计算

参数	小区 A	小区 B	小区 C	小区 D	小区 E	小区 F
C_0	0.670	0.690	0.190	0.720	1.120	0.850
R	1500	875	1060	780	1247	1150
K	0.056	0.044	0.039	0.051	0.029	0.061
LS	1.459	1.676	1.552	1.282	1.418	1.338
C	0.660	0.770	0.430	0.350	0.450	0.590
P	0.710	0.820	0.510	0.350	0.250	0.480

表 5 各小区硝态氮流失量计算值与实测值比较

小区	硝态氮流失量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)		相对误差/%	总平均误差/%
	实测值	计算值		
A	0.4185	0.5383	28.66	30.28
B	0.3277	0.4421	34.91	
C	0.0257	0.0342	33.07	
D	0.0165	0.0210	27.27	
E	0.0811	0.0622	23.30	
F	0.2138	0.2875	34.47	

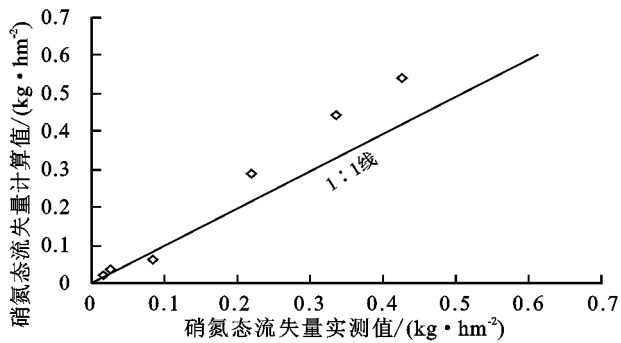


图6 硝态氮流失量计算值与实测值比较

4 结论

本文借鉴 RUSLE 公式建构思路和因子计算方法,通过国内外文献提供的资料,获得次降雨条件下各影响因子数值,并分析因子与硝态氮流失量之间的定量关系,建立了坡地径流硝态氮流失预报模型。通过统计数据资料并计算各因子的数值得出, R 因子值的变化为 $200 \sim 3\,220 (\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,且主要集中分布在 $500 \sim 2\,100 (\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 之间; K 因子值的计算受到土壤质地、土地利用方式以及土粒团聚性、颗粒组成等土壤理化性质影响,其数值的大小为 $0.007 \sim 0.092 (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$; C 值变化为 $0.006 \sim 0.930$,且不同土地利用类型的 C 值排序为:林地<草地<居民地<水田<旱地<裸地; P 值为 $0.08 \sim 0.81$,且不同水土保持措施下的 P 值大小排序为:工程措施<耕作措施<综合措施<林草措施,说明工程措施减少水土流失的效果最为显著。分析影响因子与硝态氮地表径流流失量之间的关系得出,降雨(R)、土壤(K)、地形(LS)、植被(C)、措施(P)因子与硝态氮流失量之间均呈一定的幂函数关系。利用次降雨条件下6个小区的实测流失量对公式预测结果进行检验,各小区 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量计算值与实测值之间的平均相对误差为 30.28%,采用模型确定性系数 E_f 来评价模型预测结果精度, E_f 值达到 0.772,说明模型计算结果与实测结果较为接近。由于所收集的数据资料有限,实际自然条件变异较大,本文初步建立的基于 RUSLE 模型因子的硝态氮地表径流流失预测公式,对于坡面尺度下的地表径流硝态氮流失预报分析以及水土保持优化治理具有一定的参考意义。

本文着重研究了不同影响因子下的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 地表径流流失量变化情况,但对于其他养分形态如 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 及 K^+ 等仍需要建立相应的预报模型并得出其相关计算参数;此外,应增大研究区域,获取更多的次降雨资料,从而使模型应用范围更为广泛。

参考文献:

- [1] 王全九,杨婷,刘艳丽,等. 土壤养分随地表径流流失机理与控制措施研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(6):67-82.
- [2] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [3] Crawford N H, Donigan A S. Pesticide transport and runoff model for agricultural lands[M]. Athens, GA: U. S. Environmental Protection Agency, 1973.
- [4] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process[J]. Soil Science Society America Journal,1990,54(2):312-321.
- [5] Walton R S, Volker R E, Bristow K L, et al. Solute transport by surface runoff from low-angle slopes: Theory and application[J]. Hydrological Processes,2000,14(6):1139-1159.
- [6] 任理,马军花. 考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型[J]. 水利学报,2001,4(5):38-44.
- [7] 杨金忠,蔡树英,伍靖伟. 宏观水力传导度及弥散度的确定方法[J]. 水科学进展,2002,13(2):179-183.
- [8] 胡宏祥,洪天求,刘路. 水土流失量和养分流失量的预测[J]. 环境科学研究,2009,22(3):356-361.
- [9] Tao W H, Wu J H, Wang Q J. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions[J]. Scientific Reports, 2017,3(2):1-11.
- [10] Wischmeier W, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from crop land east of the Rocky Mountains[M]. Washington D. C: Agriculture Handbook,1965:282.
- [11] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph farmland and construction sites[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1971,26(5):189-193.
- [12] Renard K, Foster G, Weesies G, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation[M]. Washington D. C: Agriculture Handbook,1997:703.
- [13] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持学报,2004,11(4):80-83.
- [14] Williams J R, Renard K Q, 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.
- [15] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transaction of American Society of Agricultural Engineer,1987,30(4):1387-1396.
- [16] 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.
- [17] 符素华, 刘宝元. 北京地区坡面径流计算模型的比较研究[J]. 地理科学, 2002, 22(5): 604-609.
- [18] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [19] 陈正发, 郭宏忠, 史东梅, 等. 地形因子对紫色土坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 83-87.
- [20] 孔刚, 王全九, 樊军, 等. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 27(3): 14-18.
- [21] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 33-35.
- [22] 张展羽, 张卫, 杨洁, 等. 不同尺度下梯田果园地表径流养分流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 105-109.
- [23] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.
- [24] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡耕地的养分流失[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 139-141, 144.
- [25] 张展羽, 于超, 杨洁, 等. 不同植被条件下红壤坡地果园氮磷流失特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 479-482.
- [26] 张展羽, 左长清, 刘玉含, 等. 水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 41-45.
- [27] 唐佐芯, 王克勤. 草带措施对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的控制作用[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 17-22.
- [28] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 等. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4576-4582.
- [29] Huang J, Wu P T, Zhao X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments[J]. Catena, 2013, 104: 93-102.
- [30] 刘泉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下坡地氮素流失特征试验分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 6-10.
- [31] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90.
- [32] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2241-2249.
- [33] 杨育红, 阎百兴. 降雨-土壤-径流系统中氮磷的迁移[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 27-30.
- [34] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 188-198.
- [35] Walton R S, Volker R E, Bristow K L, et al. Experimental examination of solute transport by surface runoff from low angle slopes[J]. Journal of Hydrology, 2000, 233(1/4): 19-36.
- [36] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5777-5785.
- [37] Higaki F, Sharpley A, Prochnow L I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays[J]. Science of the Total Environment, 2007, 373(1): 334-343.
- [38] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 59-63.
- [39] 高杨, 宋付朋, 马富亮. 模拟降雨条件下 3 种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. 水土保持学报, 2006, 25(2): 15-18.
- [40] 梁斐斐, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 81-85.
- [41] 钱晓雍, 沈根祥, 黄丽华, 等. 崇明东滩地区砂质旱田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 11-14.
- [42] 李恒鹏, 金洋, 李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 6-9.
- [43] 郑子成, 秦凤, 李廷轩. 不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 168-175.
- [44] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1038-1044.
- [45] 苏明娟, 王超. 红壤坡地养分流失预报模型研究[J]. 广东水利水电, 2013(5): 12-15.
- [46] 辛艳, 王瑄, 邱野, 等. 坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3): 346-350.
- [47] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55-58.