

# 黄土高原坝控小流域土壤 C, N, P 计量特征解析

周玮莹<sup>1,2</sup>, 杨明义<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 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; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**研究采集了陕西绥德王茂庄流域塆堰沟流域内沟壁裸露地、荒草地及耕地 3 种利用类型的土壤及坝地沉积泥沙, 分析了小流域土壤及沉积泥沙中的碳(C)、氮(N)、磷(P)的化学计量特征, 结合泥沙量与降雨侵蚀力的阶段性变化, 对流域侵蚀环境进行反演。结果表明:(1) 坝控流域内土壤 C, N, P 含量均值分别为 3.36 g/kg, 0.35 g/kg, 0.68 g/kg, C : N, C : P, N : P 均值分别是 9.30, 5.75, 0.60, 低于全国平均水平; 坝地泥沙的 C, N, P 含量均值分别为 1.76 g/kg, 0.20 g/kg, 0.55 g/kg, 坝地养分未表现出富集效应, 研究区土壤的 C : N, C : P, N : P 比值反映出土壤矿化速度较快但氮素缺乏, 限制植物生长;(2) C : P 在不同土地利用类型土壤间、土壤与沉积泥沙中均有显著差异, 因此可作为泥沙对土地利用类型变化响应的敏感指标;(3) 根据泥沙量的累积距平趋势变化曲线可以将流域侵蚀历史划分为 4 个阶段, 结合降雨侵蚀力及 C : P 值与泥沙量的回归关系, 分析了不同阶段降雨和土地利用变化对侵蚀泥沙的贡献。

**关键词:**化学计量特征; C : P; 沉积泥沙; 降雨侵蚀力

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0017-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2018.03.004

## Analysis on Stoichiometry Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Small Watershed of the Loess Plateau

ZHOU Weiyang<sup>1,2</sup>, YANG Mingyi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The check dam sediment and soils in three types of land-use of Wangmaogou Watershed in Suide County of Shaanxi Province were collected. To reproduce the change of erosion environment in small watershed, based on periodic change of sediment yield and rainfall erosivity, carbon(C), nitrogen(N) and phosphorus(P) stoichiometry of soil in small watershed and check dam sediment were analyzed. The results indicated that: (1) the mean contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus were 3.36 g/kg, 0.35 g/kg, 0.68 g/kg, the mean values of C : N, C : P, N : P were 9.30, 5.75, 0.60, lower than average of those of China soils; The mean contents of sediment carbon, nitrogen and phosphorus were 1.76 g/kg, 0.20 g/kg, 0.55 g/kg; soil C : N, C : P, N : P of the study area reflected the fast soil mineralization but lack of nitrogen, which limited the growth of plants; (2) C : P ratios among different land-used types, soil and sediment presented significant differences, which means of C : P can be used as the sensitive index indicating the response of sediment to land use types; (3) according to sediment yield, rainfall erosivity and C : P value accumulation curve, erosion can be divided into four phases, and on the basis of the relationship between rainfall erosivity and sediment yield, the contributions of the different stages of rainfall and land use change to erosion and sediment can be determined.

**Keywords:** stoichiometry characteristic; C : P; sediment; rainfall erosivity

用于探究生物系统能量和多种元素间平衡的学科称为生态化学计量学, 随着其理论的发展和完善,

该理论体系得到广泛应用<sup>[1]</sup>。土壤作为陆地生态系统的重要组成部分, 研究土壤 C, N, P 的化学计量特

收稿日期: 2017-12-25

修回日期: 2018-01-20

资助项目: 国家自然科学基金“淤地坝赋存信息解译黄土高原小流域土壤侵蚀特征演变及驱动机制”(41671281)

第一作者: 周玮莹(1992—), 女, 广西北海人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: wyzhou92@163.com

通信作者: 杨明义(1970—), 男, 山东莱州人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀核示踪研究。E-mail: ymyzly@163.com

征对探究生态系统的物质循环和多元素平衡具有重要意义<sup>[2]</sup>。Wardle 等<sup>[3]</sup>指出,土壤 C,N,P 物质循环过程因直接或间接受到土壤的母质、发育条件以及地理分布等环境因素的影响,而呈现出 C,N,P 化学计量特征比水生生态系统中更高的空间变异性。黄土高原作为我国土壤侵蚀较为剧烈的生态脆弱区,黄土高原地貌类型丰富,植被类型地带性变化明显,地形破碎,加上受人类活动扰动较大,土壤侵蚀严重,不同区域、不同土地利用类型对小流域土壤碳氮磷分布影响较大。近年来,国内学者对该区域土壤 C,N,P 化学计量特征开展的一系列研究<sup>[4-9]</sup>,研究结果表明温度、海拔、土地利用类型、人类活动及土壤物理性质变化对土壤 C,N,P 化学计量特征均有明显的影响。但目前,对遭受侵蚀较为严重的流域中,侵蚀源地的土壤与被搬运沉积的侵蚀物的泥沙二者间的 C,N,P 化学计量特征变化的研究还较少。

淤地坝是长期治理黄土高原小流域土壤侵蚀过程中创造出的一种工程措施<sup>[10]</sup>,是在水土流失地区沟道中为了拦泥淤地而修建的坝工建筑物,拦泥淤成的地称为坝地。以沟道小流域为单元修建多个不同规模的淤地坝是中国黄土高原水土流失严重区重要而独特的治沟工程体系。作为小流域的“泥沙池”,淤地坝坝地内的沉积泥沙往往赋存着较多的小流域侵蚀产沙的信息,是研究小流域侵蚀环境演化过程的良好载体。目前,基于淤地坝泥沙的研究主要集中在空间和时间上对小流域侵蚀速率及泥沙来源上<sup>[11-13]</sup>。Zhang 等<sup>[14]</sup>基于孢粉及<sup>137</sup>Cs 定年等技术解析了小流域侵蚀速率时间尺度的变化特征;部分学者利用坝地泥沙的养分元素、金属元素和稳定同位素研究了流域内不同源地在次降雨泥沙中的贡献率<sup>[15]</sup>;薛凯等<sup>[16]</sup>用<sup>137</sup>Cs 定年、结合降雨资料建立了淤地坝沉积泥沙旋回时间序列,利用指纹识别技术反演了小流域侵蚀历史与泥沙来源变化。那么,黄土高原的小流域单元内,作为侵蚀产物汇集的坝地中泥沙的 C,N,P 化学计量特征是否对侵蚀源地的土地利用类型变化有良好的响应?结合泥沙量与降雨资料,是否能够反映出小流域不同阶段产沙中自然与人为两大因素的作用?

因此,本研究主要以黄土丘陵区小流域王茂庄的典型淤地坝为研究对象,采集坝控流域内沟壁裸露地、荒草地及坡耕地 3 种土地利用类型土壤的表层样共 72 个及坝地沉积泥沙剖面的 76 个样品,对土样进行 C,N,P 共 3 种元素的化学计量特征分析,并结合降雨侵蚀力与泥沙量解释流域内自然因素及人为因素对小流域不同阶段侵蚀产沙变化特征的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

如图 1 所示,研究区位于陕西省绥德县韭园沟乡王茂沟小流域。王茂沟是黄土丘陵区具有典型代表性的流域(110°20′26″—110°22′46″E,37°34′13″—37°36′03″N),流域面积 5.967 km<sup>2</sup>,形状近似半圆形,平均宽 1.456 km,海拔 940~1 188 m,主沟长 3.75 km,沟底比降为 2.7%,沟壑密度 5.63 km/km<sup>2</sup>,沟壑面积占流域面积的 40.6%。王茂沟流域气候类型为大陆性季风气候,多年平均降雨量为 513 mm,该区的汛期(6—9 月)占年降雨量的 70%以上,多以暴雨的形式出现。该流域上部为马兰黄土,厚 5~20 m,抗蚀能力差,下部为离石黄土,再下为基岩。野外采样点为王茂沟的支沟塄焉沟 4# 坝。该坝建成于 1960 年,1991 年淤平。坝控流域面积 0.181 km<sup>2</sup>,坝内现有淤地面积约 6 000 m<sup>2</sup>,流域内主要分布有荒草地、耕地及沟壁。

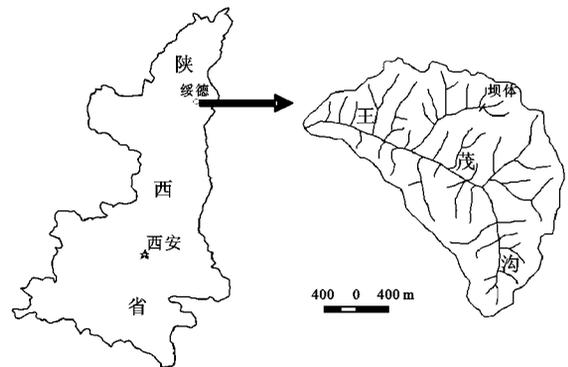


图 1 研究区地理位置

### 1.2 研究方法

1.2.1 土样采集及处理 坝控流域不同利用类型土壤的采样深度为 5 cm,沟壁比较陡直,分别在上部、中部和下部取样,小流域内共采集 72 个样品;坝地沉积旋回泥沙样品的采集是在距坝体 30 m 的坝地处挖一个垂直深度为 11.325 m 的剖面。剖面土壤样品按沉积旋回由下而上逐层采集,每个沉积旋回均用木铲取样。取样过程中保证每个沉积旋回厚度范围内的土都能取到,较厚土层根据实际厚度适当分层。沉积旋回样共采集 76 个样品。采回后,于室内自然风干,磨细后过 0.15 mm 筛,装入塑封袋中备用。土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮用半微量开氏法测定,土壤全磷用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法进行测定。

1.2.2 降雨侵蚀力计算 用次降雨指标 EI<sub>30</sub> 表征降雨侵蚀力的方法以次降雨过程资料为基础,但由于一般很难获得很长时间序列的降雨过程资料,且资料的摘录整理十分繁琐,因此一般建立降雨侵蚀力的简易

算法,即利用气象站常规降雨统计资料来估算降雨侵蚀力。由于收集到研究区域附近气象站的日降雨过程资料比较全面,因此本文采用章文波等<sup>[17]</sup>的模型方法以日降雨量计算降雨侵蚀力:

$$M=0.184 \sum_{j=1}^k (P_d I_{10d}) \quad (1)$$

式中:  $M$  表示半月时段的降雨侵蚀力精确值 ( $\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}$ );  $P_d$  表示日雨量 ( $\text{mm}$ ), 要求大于等于  $12 \text{ mm}$ , 否则以  $0$  计算;  $I_{10d}$  表示日  $10 \text{ min}$  最大雨强 ( $\text{mm}/\text{h}$ );  $k$  为半月时段的日数;  $j$  表示日的序号。

1.2.3 沉积泥沙旋回厚度及断代分析 依据薛凯等的研究结果<sup>[16]</sup>, 根据 1963 年的  $^{137}\text{Cs}$  核尘埃的沉降高峰期, 大的降雨事件以及不同沉积旋回中泥沙颗粒分布特征, 来建立各个沉积旋回层的时间序列。

1.2.4 贡献率计算 为了消除量纲对数据分析结果的影响, 先对数据进行标准化处理。本研究采用“最小—最大标准化”, 即对原始数据进行线性变换, 将标准化对象的原始值通过转化后映射为在区间  $(0, 1]$  中的变换值, 其具体计算方法为:

$$\text{标准化数据} = (\text{原始数据} - \text{极小值}) / (\text{极大值} - \text{极小值}) \quad (2)$$

将标准化后的数据进行多元非线性回归分析, 根据霍洛特公式<sup>[18]</sup> 计算各因子对因变量的贡献率, 计算公式如下:

$$P_i = \frac{R^2}{\sum_{i=1}^n \beta_i^2} \beta_i^2 \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个因素的贡献率;  $R^2$  为复回归平方;

表 1 土壤 C,N,P 含量及化学计量特征的描述性统计特征

变量指标	最小值	最大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数
C/(g · kg <sup>-1</sup> )	0.84	7.21	3.36	1.46	0.35	0.13	0.44
N/(g · kg <sup>-1</sup> )	0.11	0.71	0.35	0.13	0.40	0.13	0.36
P/(g · kg <sup>-1</sup> )	0.48	0.68	0.59	0.04	-0.27	-0.02	0.07
C : N	4.66	12.6	9.30	1.53	-0.64	0.99	0.16
C : P	1.46	12.87	5.75	2.59	0.50	0.10	0.45
N : P	0.18	1.27	0.60	0.23	0.68	0.25	0.38
C : N : P	9.41	21.03	15.88	2.58	-0.26	-0.04	0.16

表 2 不同利用类型土壤 C,N,P 化学计量特征差异性

利用类型	C/(g · kg <sup>-1</sup> )	N/(g · kg <sup>-1</sup> )	P/(g · kg <sup>-1</sup> )	C : N	C : P	N : P	C : N : P
沟壁	1.31 ± 0.58c	0.19 ± 0.06c	0.56 ± 0.05b	7.06 ± 1.44b	2.32 ± 0.89c	0.33 ± 0.09c	12.61 ± 2.22b
荒草	4.21 ± 1.35a	0.43 ± 0.12a	0.58 ± 0.04b	9.79 ± 1.01a	7.34 ± 2.43a	0.74 ± 0.22a	17.00 ± 2.01a
耕地	3.11 ± 0.50b	0.32 ± 0.05b	0.61 ± 0.03a	9.69 ± 1.24a	5.19 ± 0.81b	0.53 ± 0.08b	15.83 ± 2.13a

注: 不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异。

土壤 C,N,P 化学计量特征不仅能够反映土壤系统功能的变异性, 且元素间的计量比是反映土壤有机质构成、土壤质量状况以及养分供给能力的一个重

$\beta_i = b_i \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y}$ , 其中,  $b_i$  为第  $i$  个元素的回归系数;  $\sigma_{xi}$  为第  $i$  个因素的均方差;  $\sigma_y$  为因变量的均方差。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2010, Origin 7.5 软件中进行整理和作图; 采用 SPSS 21.0 (IBM) 对数据进行正态分布检验和 Pearson 相关分析、单因素方差分析和多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 C,N,P 化学计量特征

流域 0—5 cm 土壤 C,N,P 化学计量特征进行描述性统计及差异性分析结果见表 1, 表 2。土壤中的 C,N,P 含量均值分别为 3.36 g/kg, 0.35 g/kg, 0.68 g/kg; C : N, C : P, N : P 的均值分别为 9.30, 5.75 及 0.60; C : N : P 的均值为 9.58 : 1 : 1.67; 其中, P 元素含量以及 C : N 分布呈负偏态, 其余元素含量及计量值分布均为正偏态; P 元素分布低阔, 其余元素及其计量值分布高狭。变异系数是描述样本观测值空间变异程度的主要指标, 在该小流域内的土壤 C,N 元素含量及其化学计量比的变异系数均处于 0.1~1.0 范围内, 属中等变异程度; 而 P 元素含量的变异系数为 0.07, 小于 0.1, 变异程度较弱。

坝控流域内分布有荒草地、耕地及沟壁裸露地 3 种利用类型, 各利用类型土壤间的 C,N,P 化学计量特征见表 2。3 种利用类型土壤的 C,N,C : P,N : P 有显著差异 ( $p < 0.05$ ), 均表现为荒草地 > 耕地 > 沟壁, 沟壁的 C : N, C : N : P 显著低于荒草地与耕地, 耕地的 P 元素含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于荒草地与沟壁。

要指标。总的来说, 研究区表层土壤的 C,N,P 元素的含量、C : N, C : P 以及 N : P 远远低于全国水平 (C: 24.56 g/kg, N: 1.88 g/kg, P: 0.78 g/kg, C : N

为 14.4, C:P 为 136, N:P 为 9.3)。不同利用类型土地造成土壤 C, N 含量在流域内分布呈中等变异程度, 这是因为土壤 C, N 主要都来源于有机质, 而土壤有机质主要来源于外源的输入, 如: 动、植物残体经过微生物的分解, 因此耕地与荒草地比沟壁有更高的有机质输入。但耕地由于长期人为耕作扰动以及作物长期的养分消耗, 因此耕地较荒草地土壤 C, N 含量略低。土壤全磷主要受到成土母质和施肥等农田措施管理的影响, 研究区土壤的成土母质均为黄土母质, 其中的农耕地几乎不施用磷肥, 因此土壤 P 含量的空间变异程度很弱。C:N 是一项能够反映土壤质量的指标, 当  $C:N > 25$  时, 表示土壤有机碳的累积速率高于分解的速率, 而较低的 C:N 值表征着土壤的矿化作用较快<sup>[2]</sup>, N:P 往往能够表征 P 的有效性<sup>[19]</sup>, C:P 小于 200 表明土壤中的营养元素得到矿化。对比表 2 可知, 在研究区内, 总体 C:N 的范围是 4.66~12.6; C:P 的值在 1.46~

12.87 之间, 小于 200; N:P 变化范围为 0.18~1.27, 小于表征土壤氮素缺乏的最小值 14, 且远低于全国的 9.3 水平<sup>[2,20]</sup>。研究区土壤 C, N, P 化学计量比特征反映出土壤的营养元素得到矿化且处于较低水平, 土壤 N 供应不足。

## 2.2 坝地泥沙 C, N, P 化学计量特征

表 3 给出了沉积泥沙 C, N, P 含量及化学计量特征的描述性统计特征。坝地沉积泥沙的 C, N, P 含量均值分别为 1.76 g/kg, 0.20 g/kg 及 0.55 g/kg, C:N, C:P, N:P 均值分别为 8.90, 3.20, 0.37, C:N:P 为 8.90:1:2.70; C 含量在 0.92~3.83 g/kg 范围内变化, 变异系数为 0.27, N 含量范围为 0.12~0.43 g/kg, 变异系数与 C 一致, P 最小值为 0.46 g/kg, 最大值为 0.61 g/kg, 变异系数为 0.04。在空间变异程度上, 除了 P 处于弱变异程度外, 其他变量均处于中等变异程度。其中, C 与 N, C:P 与 N:P 的变异系数几乎相等。

表 3 沉积泥沙 C, N, P 含量及化学计量特征的描述性统计特征

变量指标	最小值	最大值	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数
C/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.92	3.83	1.76	0.47	1.73	4.49	0.27
N/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.12	0.43	0.20	0.05	1.77	4.14	0.27
P/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.46	0.61	0.55	0.02	-0.005	2.39	0.04
C:N	5.57	12.25	8.90	1.24	-0.019	0.17	0.14
C:P	1.66	6.28	3.20	0.82	1.399	2.48	0.26
N:P	0.23	0.71	0.37	0.09	1.46	2.53	0.26
C:N:P	9.66	23.15	16.32	2.50	0.02	0.14	0.15

图 2 为各利用类型土壤与泥沙的 C, N, P 化学计量特征差异分布图。

由图 2 可看出, 由于坝地沉积泥沙是坝控流域土壤遭受侵蚀的产物, 经过搬运与堆积后的泥沙与各利用类型土壤中的 C, N, P 化学计量特征存在一定程

度的差异。泥沙中的 C, N 含量显著 ( $p < 0.05$ ) 低于流域耕地及荒草地土壤, 而与沟壁的 C, N 含量无显著差异; 各利用类型土壤的 C:P 与泥沙的均有显著 ( $p < 0.05$ ) 差异, 值得注意的是, 泥沙的 C:N, N:P 与各利用类型土壤的差异性明显不显著。

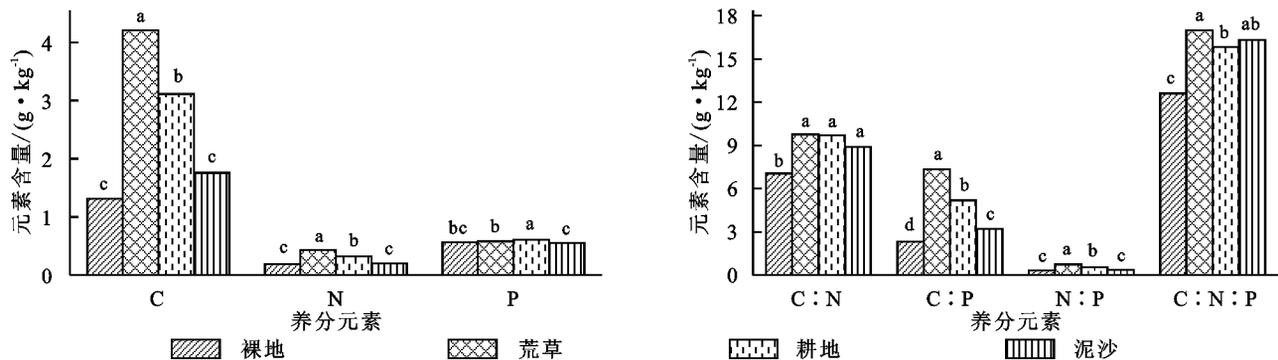


图 2 各利用类型土壤与泥沙的 C, N, P 化学计量特征差异

结合表 2 和图 2 对比可得出, C:P 这一指标对于土地利用方式变化有着明显的响应, 泥沙中的 C:P 与各侵蚀源地土壤的 C:P 有着显著差异。国外基于沼泽、湖泊沉积物的研究<sup>[21-23]</sup>结果表明在每个大于

2 cm 的沉积旋回层中, 泥沙的有机质、全磷等含量的变化非常微小, 并且不受埋藏时长的显著影响, 因此泥沙中 C:P 的变化主要受到不同土地利用类型的来源地的影响, 故而 C:P 这一指标可以作为土地利

用方式的变化较为敏感的反映指标。

### 2.3 坝地沉积泥沙 C,N,P 对降雨侵蚀力的响应

不同沉积旋回厚度对应的降雨侵蚀力及泥沙量、不同旋回层中泥沙的 C:P 分布见图 3。从图中可以看出,C:P 随着深度的变化,在总体上呈现出规律的锯齿型变化特征,变化较平缓,在 1 095.5~1 112.5 cm 处有突变,达到最大值 6.28。降雨侵蚀力、泥沙量和沉积旋回层厚度三者有着紧密的同步变化关系,降雨侵蚀力大,泥沙量大,相应的沉积旋回层厚。在 189.5~321.5 cm 范围内降雨侵蚀力处于中等水平、C:P 较低,而对应的泥沙量较高。

为了更加直观地表现降雨侵蚀力、泥沙量及泥沙中 C:P 的变化关系,我们给出了三者的累积距平百分比随着沉积旋回层变化的趋势曲线,见图 4。沉积

旋回层的数字越大说明沉积发生的时间越早,因此,横坐标上 76 表示第 1 个旋回层。泥沙量累积距平在第 13,49,57 旋回层(对应横坐标 64,28,20)出现了明显拐点,在第 1~13 旋回层(对应横坐标 76~64),泥沙累积距平百分比呈上升趋势,在第 14~49 旋回层(横坐标 63~28)总体上呈现下降的趋势,第 50~57 旋回层(横坐标 27~20)有短暂的回升后在第 58~76(横坐标 19~1)旋回层下降。降雨侵蚀力累积距平百分比曲线的变化趋势与泥沙量的大致相同。而 C:P 累积距平百分比的曲线在不同沉积层中大致划为两个阶段,即在第 1~49 旋回层内递减而在第 50~76 旋回层内递增。累积曲线呈现规律的线性增长或降低说明该指标在这一阶段内较为稳定地维持高于或低于均值的水平。

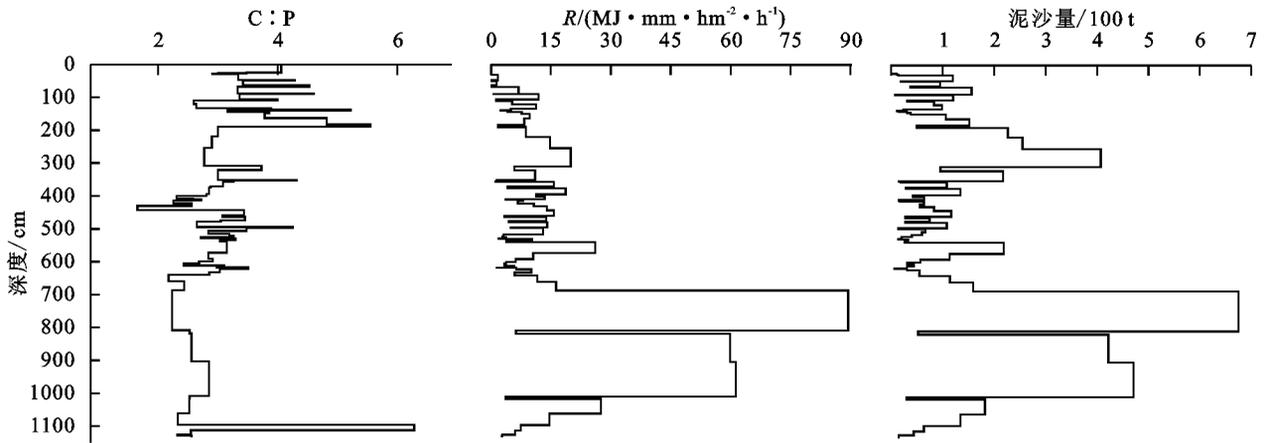


图 3 沉积泥沙旋回层对应的 C:P、降雨侵蚀力与泥沙量

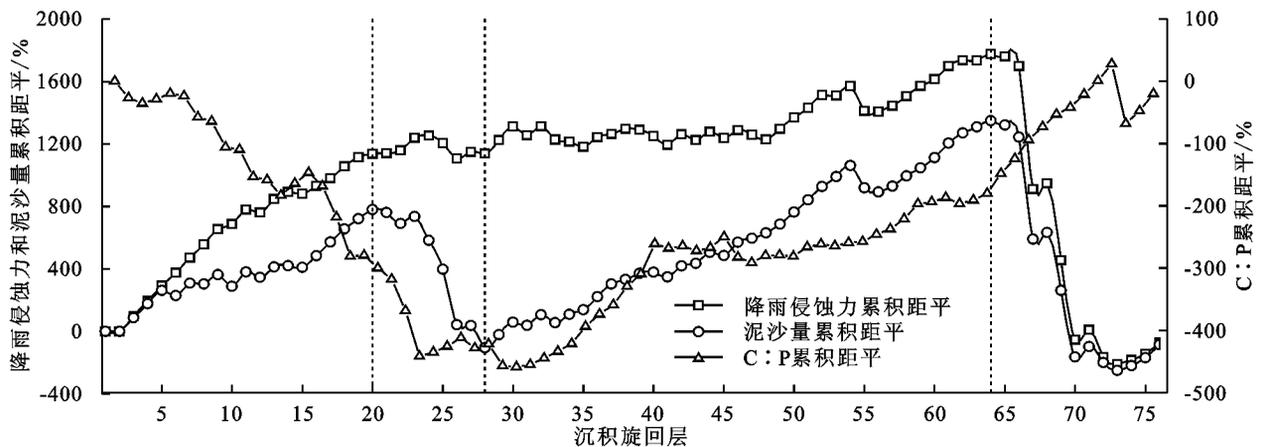


图 4 C:P 降雨侵蚀力与泥沙量累积距平百分比变化趋势

根据泥沙量累积距平百分比曲线明显的拐点,结合薛凯等<sup>[16]</sup>对该坝地沉积旋回层的断代结果将流域的侵蚀变化特征划分成了 4 个阶段,将各阶段的泥沙量、降雨侵蚀力以及 C:P 标准化后进行拟合,并根据霍罗特的公式计算降雨侵蚀力及 C:P 对泥沙量的贡献率,结果见表 4。

由表 4 可知,小流域的侵蚀模数在 1960—1964 年及

1984—1987 年间显著较大,反映这两个阶段小流域遭受的侵蚀剧烈;在 1966—1983 年的侵蚀模数在 4 个阶段中最小。从贡献率来看自然与人为两大因素对小流域侵蚀产沙的影响:以 1960—1964 年间,降雨对于泥沙量的贡献率为 98.86,土地利用类型的变化对泥沙量的贡献率较小,表明该阶段小流域内土壤侵蚀主要由降雨造成;在 1965—1983 年间,土地利用的变化对整个小流域

的侵蚀产沙过程表现出了减沙的作用,降雨侵蚀力对泥沙量的贡献率依旧高达 82.75%,自然因素依旧是造成小流域水土流失的主要原因。经过对当地记载材料的查验,在该阶段小流域内出现了许多水土保持措施,人为因素减少了侵蚀产沙。自 1984 年起至 1990 年,总体上,土地利用类型发生变化极大程度上促进

了小流域的侵蚀产沙,1984—1986 年间土地利用变化对泥沙量的贡献率高达 52.63%,1987—1990 年则为 40.08%。1984 年起,虽有上一阶段的水土保持措施的减沙效益,但该阶段内随着土地包产到户政策的实施,农民在流域内进行的大面积开荒、陡坡开垦等生产活动极大程度促进了侵蚀的发生。

表 4 各阶段自然因素与人为因素在泥沙中的贡献率

阶段 划分	对应沉积 旋回层	侵蚀模数/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	方程	贡献率			
				土地利用	降雨		
第一阶段(1960—1964 年)	64~76	26224	$Y=11.602X_1^{0.949}X_2^{-0.1176}$	$R^2=0.9914$	$p=0.000$	-0.30	98.86
第二阶段(1966—1983 年)	29~63	5899	$Y=1.7959X_1^{1.2451}X_2^{0.07318}$	$R^2=0.8169$	$p=0.000$	+0.02	82.75
第三阶段(1984—1986 年)	19~28	25838	$Y=69.5677X_1^{0.8483}X_2^{-0.4645}$	$R^2=0.9193$	$p<0.005$	-52.63	39.41
第四阶段(1987—1990 年)	1~18	14095	$Y=39.315X_1^{0.8758}X_2^{-0.6678}$	$R^2=0.6581$	$p<0.001$	-40.08	25.00

注:Y 为泥沙量(t); $X_1$ 、 $X_2$  分别为降雨侵蚀力及 C:P 值;土地利用贡献率(+)为减沙,(-)为增沙。

结合图 4 中 C:P 累积距平百分比曲线变化趋势分析:在第一、二阶段内,坝地泥沙 C:P 总体上持续低于均值,可大致判断该阶段内的泥沙大部分来源于养分贫瘠的沟壁处土壤。从 1984 年起,泥沙中的 C:P 含量持续高于均值,说明了该流域内人们的活动对小流域内的土地利用类型造成了较大影响,增大了对流域内土壤有机质等养分的输入,从而提高了该阶段内泥沙中的 C:P。根据泥沙中的 C:P 累积变化可反映出小流域在 1984 年起人们开荒开展生产活动过程中,施肥等田间管理方法影响着小流域土壤养分的总体分布情况。

### 3 结论

通过对研究区的土壤与坝地沉积泥沙的研究发现:土壤养分含量水平整体偏低,坝控流域土壤 C:N 的均值为 9.30,低于 25;N:P 均值为 0.60,小于表征土壤氮素缺乏的最小值 14,说明该区土壤处于较快的矿化作用中,流域内土壤氮素缺乏,限制植物的生长。在各项化学计量特征指标中,仅 C:P 在坡面上不同土地利用类型土壤间差异显著,且泥沙中的 C:P 与坡面上不同利用方式的土壤也有显著差异,说明 C:P 对于土地利用类型的变化相应敏感,因此它可作为对于人类活动造成土地利用方式变化的响应指标。结合泥沙量与降雨侵蚀力,该淤地坝泥沙在 1960—1983 年期间,主要来源于重力侵蚀造成的沟壁坍塌及沟道扩张。在此期间,1965—1983 年小流域内出现的水土保持措施总体起到了很好的减沙作用。在 1984—1986 年间,人们大面积的开荒造田极大程度上促进了小流域内产沙。1987—1990 年,坡面耕地面积的增加、田间管理措施影响着坡面表层土壤肥力,但坝地中的泥沙养分未表现出显著的富集效应。

#### 参考文献:

- [1] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):141-153.
- [2] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [3] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. [J]. Science, 2004,305(5683):509-513.
- [4] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [5] 张向茹,马露莎,陈亚南,等.黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J].土壤学报,2013,50(4):818-825.
- [6] 李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].环境科学,2015,36(8):2988-2996.
- [7] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.
- [8] 徐明,张健,刘国彬,等.黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地土壤碳氮磷元素的影响[J].草地学报,2015,23(1):62-68.
- [9] 李丹维,王紫泉,田海霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.
- [10] 李勉,姚文艺,史学建.淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究[J].水土保持研究,2005,12(5):111-115.
- [11] 李勉,杨剑锋,侯建才,等.黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J].农业工程学报,2008,24(2):64-69.
- [12] 文安邦,张信宝,沃林 de.黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的<sup>137</sup>Cs 法研究[J].地理学报,1998,53(S1):124-133.

(下转第 28 页)

- moisture content on the bond strength and water resistance of bonded wood joints [J]. *Bioresources*, 2014, 9(3):5208-5218.
- [5] Tabibnejad A, Heshmati A, Salehzadeh H, et al. Effect of gradation curve and dry density on collapse deformation behavior of a rockfill material [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(3):631-640.
- [6] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. *水利学报*, 2001, 32(7):79-84.
- [7] Zhong Z, Liu Y, Liu X, et al. Influence of moisture content on shearing strength of unsaturated undisturbed quaternary system middle Pleistocene [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22:2776-2782.
- [8] 张文毅, 党进谦, 朱彭涛, 等. 重塑黄土强度试验研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(5):53-55.
- [9] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2):413-420.
- [10] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田原生地面放水冲刷试验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(S):59-62.
- [11] Wang G, Li T. Simulation of soil erosion in the Yellow River Basin [C]. *Proceedings of the 4th International Yellow River Forum on Ecological Civilization and River Ethics*, 2010.
- [12] Xu X, Liu Z, Wang W, et al. Which is more hazardous: avalanche, landslide, or mudslide [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76:1939-1945.
- [13] 姜娜, 邵明安, 雷廷武, 等. 水蚀风蚀交错带典型土地利用方式土壤水分变化特征[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6):134-137.
- [14] 南京水利科学研究所. 中华人民共和国行业标准: 土工试验规程 SL237-1999[S]. 中国水利水电出版社, 1999.
- [15] Xu X, Liu Z, Xiao P, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. *Catena*, 2015, 135:231-239.
- [16] 肖培青, 姚文艺, 刘希胜, 等. 植被固土减蚀作用的力学效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):59-62.
- [17] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
- [18] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. *工程地质学报*, 2005, 13(1):18-28.
- [19] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红黏土抗剪强度的水敏性研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2011, 43(1):17-22.
- [20] Adekalu K O, Okunade D A, Osunbitan J A. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations [J]. *International Agrophysics*, 2007, 21(1):1-5.
- [21] 王林浩, 白晓红, 冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2):132-135.
- [22] Guo W Z, Xu X Z, Wang W L, et al. A measurement system applicable for landslide experiments in the field [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(4):044501.

(上接第 22 页)

- [13] Zhao G, Klik A, Mu X, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 241:343-352.
- [14] Zhang X, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed loess deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century [J]. *Catena*, 2009, 79(3):205-213.
- [15] 杨明义, 徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2):30-34.
- [16] 薛凯, 杨明义, 张凤宝, 等. 利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J]. *核农学报*, 2011, 25(1):115-120.
- [17] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. *地理研究*, 2002, 21(3):384-390.
- [18] 霍洛特, 谭锦维. 农业生产效果预测[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [19] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2):296-302.
- [20] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [21] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C : N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22(4):439-442.
- [22] Brenner M, Binford M W. A sedimentary record of human disturbance from Lake Miragoane, Haiti [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1988, 1(2):85-97.
- [23] Melenevskii V N, Leonova G A, Konyshov A S. The organic matter of the recent sediments of Lake Beloe, West Siberia (from data of pyrolytic studies) [J]. *Russian Geology & Geophysics*, 2011, 52(6):583-592.