

滇南小流域 3 种土地利用方式下土壤侵蚀及 养分流失特征

王永平¹, 周子柯¹, 滕昊蔚¹, 牛晓音², 李晓辉²

(1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要:以滇池西南部东大河小流域为研究靶区, 利用¹³⁷Cs 核素示踪技术, 对研究区内林地、草地、耕地 3 种土地利用类型的土壤侵蚀量及土壤总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)流失量进行了定量分析及评价, 并通过土壤养分生态化学计量特征(碳氮比 C/N、碳磷比 C/P、氮磷比 N/P)揭示当地土壤肥力状况。结果表明: (1) 不同土地利用方式下土壤侵蚀存在差异。平均侵蚀程度大小表现为耕地[1 538.74 t/(km² · a)] > 草地[1 308.82 t/(km² · a)] > 林地[81.88 t/(km² · a)], 流域整体侵蚀程度介于轻度侵蚀到中度侵蚀之间, 但草地、耕地仍高于当地允许流失量。(2) 不同土地利用方式对土壤养分含量分布及流失量具有一定影响, 并且土壤侵蚀与养分流失关系密切。TOC, TN, TP 含量大小表现的规律不尽相同, 林地土壤养分流失量最小, 土壤养分状况多数在 3 级以上, 土壤肥力状况较好。(3) 土壤侵蚀通过影响养分流失对土壤养分生态化学计量特征产生间接影响, 土壤 C/N 规律为耕地(6.95) > 草地(6.14) > 林地(3.14); 土壤 N/P 为林地(10.99) > 草地(10.07) > 耕地(4.82); 土壤 C/P 为草地(57.47) > 林地(39.94) > 耕地(27.55), C/N, C/P, N/P 均较低, 表明土壤有机质矿化速率较快, 并且磷的有效性较高, 流域内植被生长在一定程度上主要受 N 元素影响。

关键词:土地利用; 土壤侵蚀; 养分流失; ¹³⁷Cs 示踪; 生态化学计量特征

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)01-0011-08

Characteristics of Soil Erosion and Nutrient Losses in Three Land Use Patterns in the Small Watershed of Southern Dianchi

WANG Yongping¹, ZHOU Zike¹, TENG Haowei¹, NIU Xiaoyin², LI Xiaohui²

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. School of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract: In this study, the soil erosion and nutrients (total organic carbon, total nitrogen and total phosphorus) losses in woodland, grassland and cultivated land were investigated based on ¹³⁷Cs radionuclide tracer technology at Dongdahe catchment of Dianchi watershed. At the same time, soil fertility conditions in the three land use types were revealed through ecological stoichiometric characteristics of soil nutrients (C/N, C/P, N/P). The results showed that: (1) there were differences in soil erosion under different land use patterns; the average erosion rate decreased in the order: farmland [1 538.74 t/(km² · a)] > grassland [1 308.82 t/(km² · a)] > forestland [81.88 t/(km² · a)]; the average erosion degree of the basin was between mild erosion and moderate erosion, but the erosion rates of grassland and farmland were still higher than the local allowable loss rate; (2) different land use patterns had certain effects on the distribution of soil nutrient content and soil nutrient losses; a close relation between soil erosion and nutrient loss was observed; the patterns of TOC, TN and TP contents in three land types were different; the soil nutrient loss in forestland was the lowest, most soil nutrient levels were above grade 3, and the soil fertility was better; (3) soil erosion affected soil nutrient stoichiometric characteristics indirectly by affecting nutrient losses, soil C/N decreased in the order: farmland (6.95) > grassland (6.14) > woodland (3.14); soil N/P decreased in the

收稿日期: 2020-02-10

修回日期: 2020-03-31

资助项目: 国家自然科学基金“滇南小流域土地利用对土壤侵蚀和氮磷流失影响的同位素示踪”(41703099)

第一作者: 王永平(1994—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向为区域水土保持和生态修复。E-mail: 1040428646@qq.com

通信作者: 牛晓音(1977—), 女, 山东淄博人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事区域水土保持和环境演变以及污染生态修复。E-mail: zbnxy@sdu.edu.cn

order: forestland (10.99) > grassland (10.07) > farmland (4.82); Soil C/P decreased in the order: grassland (57.47) > woodland (39.94) > cultivated land (27.55); lower C/N, C/P and N/P indicated that the mineralization rate of soil organic matter was fast and the availability of phosphorus was high. Vegetation growth was mainly affected by N element to a certain extent in this catchment.

Keywords: land use; soil erosion; nutrient loss; ^{137}Cs tracing; ecological stoichiometric characteristics

水土流失是我国乃至全球最大的生态环境问题之一。云南省属于我国水土流失二级敏感区,其中滇池流域作为云南省境内第一大淡水湖,流域内水土流失问题受到各界的广泛关注,解决水土流失问题,恢复当地生态环境已成当务之急。尤其是近年来人类活动的加剧,不合理的土地利用,对土壤生态平衡、经济发展和环境的协调性有着非常重要的影响,在小流域尺度上影响更为明显^[1]。土地利用方式的变化是人类活动最直观的表现,也是影响土壤养分的直接因素^[2]。土壤肥力是土壤各种基本性质的综合表现,土壤碳、氮、磷等元素是土壤肥力最直观的表征元素,定量表征土壤肥力及其评价已经成为国内外研究者关注的热点问题之一^[3]。此前有部分学者对滇池典型小流域内土地利用变化下的土壤及养分侵蚀开展定量研究,陈春瑜等^[4]揭示了滇池流域不同土地利用下的养分以及化学计量特征的时空分布规律,牛晓音等^[5]揭示了滇池南部双龙流域土壤侵蚀与土壤养分在不同土地利用方式上含量分布的差异,崔骏^[6]探究了滇池北部小流域不同土地利用方式下碳、氮、磷、硫等养分的流失特征,揭示了人类活动对土壤养分的影响。上述研究中多单一侧重土壤侵蚀或养分空间分布特征,但滇池小流域众多且空间异质性强,人类活动干扰强度不同对区域土壤环境的影响也会存在差异。因此从小流域尺度上综合分析侵蚀、养分流失特征及土壤质量现状方面的研究有待加强。

本研究选取滇池南部的东大河流域为研究靶区,通过 ^{137}Cs 核素示踪技术对该流域内土壤侵蚀进行定量分析及评价,在土壤侵蚀的基础上,将土壤侵蚀与养分流失相结合,旨在探究二者在不同土地利用下的流失特征,揭示不同土地利用对土壤及养分流失的影响,并通过土壤养分生态化学计量特征揭示土壤养分水平。对减缓当地生态压力,改善生态环境以及对政府和相关部门的土地利用规划具有重要的指示意义。为当地土地利用变化对滇池流域面源污染及土地退化的影响研究提供可靠的参考依据。

1 研究区概况

东大河流域是滇池西南部的一个小流域(102°29′—102°39′E, 24°31′—25°42′N);发源于海孜白泥箐,汇

入滇池,全长 21 km,流域面积 188 km²。流域境内行政区划为晋宁区。属于亚热带湿润季风气候,年温差较小,多年平均气温 14.8℃。平均最高气温 21.6℃,平均最低气温 9.7℃,多年平均年降水量 900 mm。土壤以酸性、微酸性土壤为主,土壤母质为灰岩、砂岩残积物、坡积物和冲洪积物,流域境内土壤类型以红壤、黄棕壤、紫色土为主。主要土地利用类型以林草地为主,主要植被类型为云南松(*Pinus yunnanensis*)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、青冈(*Quercus glauca* Thunb.)、金合欢(*Acacia farnesiana* (Linn.) Willd.)、萌芽灌木等乔灌混交林。

2 研究方法

2.1 样品采集

2018 年 8 月在东大河小流域内采集 3 种土地利用类型(林地(F)、草地(G)、耕地(C))土壤样品,根据采样地区地形地貌,并结合实地考察和 GPS 进行定位选点,使样点均匀分布,共采集代表性样点 12 个,平均每种用地类型 4 个样点,样点具体情况见表 1。采集样为土壤全样,采用土壤取样器垂直入土层取样,采样深度为 40 cm,分为上下两层,每层 20 cm,按对角线法平行采样 3 次,取混合样。

表 1 采样地基本情况

用地类型	植物(作物)种类	坡度/(°)	土壤亚类
林地	马尾松、云南松	20.54~31.20	红壤、红棕壤
草地	芒草、白茅	7.32~24.31	黄棕壤
耕地	玉米	3.51~10.72	红壤、红棕壤

2.2 样品测试与分析

2.2.1 土壤侵蚀模数

(1) ^{137}Cs 比活度的测定:将土壤样品自然风干后、经研磨过 100 目筛,在 105℃下烘干。蜡封 30 d 后,采用高纯锗探测器 γ 谱仪(GWL-120-15, ORTEC, USA)在 661.6 keV 处的 γ 射线谱峰面积测定 ^{137}Cs 的比活度。

(2) 土壤 ^{137}Cs 的背景值: ^{137}Cs 示踪法估算土壤侵蚀需要确定当地背景值,研究表明滇池流域 ^{137}Cs 含量背景值为 1 269 Bq/m²^[7], 860 Bq/m²^[8],其中张燕等^[9]以及张明礼等^[10]确定的滇池流域背景值较为

接近,分别为 906 Bq/m^2 , 918 Bq/m^2 , 因此采取二者平均值 912 Bq/m^2 作为研究区背景值更为可信。

(3) 基于本研究林、草地剖面 ^{137}Cs 的指数规律分布,采用 Zhang 等^[11] 建立的非耕地土壤侵蚀模数模型:

$$A_d = A_{\text{ref}}(1 - e^{-\lambda d}) \quad (1)$$

式中: A_d 为土壤在深度 d 以上 ^{137}Cs 的总面积活度 (Bq/m^2); A_{ref} 为 ^{137}Cs 面积活度背景值 (Bq/m^2); λ 为 ^{137}Cs 深度分布的剖面指数(无量纲),本研究采用张明礼^[12] 对滇池流域土壤侵蚀研究中的数值 0.27, d 为深度 (cm); 假设 ^{137}Cs 在随深度的分布不受时间的影响,侵蚀点土壤年侵蚀厚度可用下式计算:

$$h_i = \frac{1}{(t - 1963)\lambda} \ln\left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_d}\right) \quad (2)$$

式中: h_i 为土壤年侵蚀厚度 (cm/a); t 为采样年份

(4) 耕地土壤侵蚀模数模型:采用张燕等^[13] 提出的耕作土土壤侵蚀模型

$$h_i = H_c \frac{(A_{\text{ref}} - A_d)}{(A_{\text{ref}} - A_{\text{in}}) \times (t - t_0)} \quad (3)$$

式中: H_c 为耕层厚度 (20 cm); A_{in} 为渗入耕层以下的 ^{137}Cs 比活度 (Bq/m^2); t_0 取 1963。

根据式(4)计算土壤侵蚀模数。

$$E_{Ri} = 10000 \times h_i \times D_i \quad (4)$$

式中: E_{Ri} 为第 i 采样点的侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; D_i 为第 i 采样点的土壤容重 (g/cm^3)。

根据式(5)计算平均侵蚀模数。

$$E_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{Ri} \quad (5)$$

式中: E_A 为区域平均侵蚀模数 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; n 为样点数量。

2.2.2 土壤总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的测定 土样自然风干后,去除石块、杂草,并研磨过 200 目筛,分成三份,分别用于测定土壤 TOC, TN, TP。测定方法参考《土壤农化分析》^[14]。

2.2.3 土壤总有机碳、总氮、总磷的流失量计算 单位面积土壤养分流失量采用张燕等^[13] 建立的模型计算。

$$L = N \times D_i \times h_i \times 10 \quad (6)$$

式中: L_i 为养分的流失量 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; N 为养分在

土壤中的含量 (mg/g); D_i 为 i 样点的土壤容重 (g/cm^3); h_i 为 i 样点土壤的年侵蚀厚度 (cm/a)。

$$L_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (7)$$

式中: L_A 为平均养分流失量 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; L_i 为 i 采样点的养分流失量 [$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]; n 为样点数量。

2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理和作图;采用 SPSS 22.0 软件进行 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型的土壤侵蚀特征

由表 2 可知,上层土壤中 ^{137}Cs 含量大小为林地 (890.42 Bq/m^2) > 草地 (209.56 Bq/m^2) > 耕地 (121.84 Bq/m^2), 下层土壤 ^{137}Cs 含量为林地 (221.98 Bq/m^2) > 耕地 (102.47 Bq/m^2) > 草地 (29.68 Bq/m^2), 上下层略有差异。3 种用地类型中,上层土壤 ^{137}Cs 含量高于下层。草地耕地上下层总平均含量较为接近,但在耕地中分布较为均匀,草地上下层差异较大。根据式(1—4)计算不同用地类型的土壤侵蚀或沉积模数,在 3 种土地利用方式下,土壤侵蚀模数表现出较大的差异,尤其是林地利用类型。林地侵蚀模数介于 $-522.12 \sim 516.20 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均侵蚀模数为 $81.88 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 土壤侵蚀变异系数高达 463%, 相较于其他用地类型,只有林地出现了沉积。草地土壤侵蚀模数介于 $990.51 \sim 1\ 615.57 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均侵蚀模数为 $1\ 308.82 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 3 种用地类型中草地侵蚀模数变异系数最小。耕地土壤侵蚀模数介于 $726.78 \sim 2\ 488.51 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均侵蚀模数为 $1\ 538.74 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 变异系数高于草地。不同土地利用类型中平均土壤侵蚀模数大小表现为耕地 > 草地 > 林地。本研究调查样地中,耕地与草地均无沉积发生,且耕地平均侵蚀模数与草地相差不大,略高于草地,二者平均侵蚀模数皆均远高于林地,约为林地的 16~19 倍。根据水利部制定的土壤侵蚀分类分级标准,研究区内土壤侵蚀程度皆处于中度侵蚀 [$> 2\ 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] 以下,且多数处于轻度侵蚀 [$< 1\ 000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]。

表 2 不同土地利用类型土壤侵蚀特征

用地类型	$^{137}\text{Cs}/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2})$				土壤侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$			
	0—20 cm	均值	20—40 cm	均值	变化范围	平均值	标准差	CV/%
林地	445.24~1889.57	890.42	135.90~312.76	221.98	-522.12~516.20	81.88	379.42	463
草地	150.77~324.69	209.56	18.49~50.90	29.68	990.51~1615.57	1308.82	221.12	16.8
耕地	36.57~260.43	121.84	15.06~208.35	102.47	726.78~2488.51	1538.74	677.00	44.0

注:表中负值代表沉积。

3.2 不同土地利用类型土壤养分含量及垂直分布特征

基于采样方式,每个样点分为上下两层,其中上层土层深度为 0—20 cm,亦为当地耕层深度;深层土壤为 20—40 cm。土壤 TOC 含量随着垂直深度的变化基本全部呈现下降趋势,但下降程度并不一致,林地、草地的 TOC 含量随着深度的增加呈较为明显的下降趋势。由表 3 可知,林地上层土壤 TOC 变动范围为 15.18~39.63 mg/g,深层为 0.93~11.01 mg/g,平均含量由 25.24 mg/g 下降到 5.86 mg/g,降幅达到 76.8%;草地上层土壤中 TOC 含量变化范围为 17.62~55.4 mg/g,深层含量范围为 5.79~15.07 mg/g,平均含量从 31.64 mg/g 下降到 11.19 mg/g,降幅为 64.7%;耕地上层土壤中 TOC 含量则在 7.3~28.16 mg/g 范围之内,深层含量介于 10.08~19.35 mg/g,平均含量从 18.92 mg/g 下降到 14.31 mg/g,降幅为 24.4%。不同用地类型中,平均土壤 TOC 含量表现为草地(22.41 mg/g) > 耕地(16.62 mg/g) > 林地(15.55 mg/g)。

林地、草地土壤 TN 含量及变化趋势类似,耕地 TN 含量明显低于其他两种土地利用类型。3 种土地利用类型均表现出随着土层深度变化而减小的趋势,但上层和深层土壤 TN 含量差别较小,下降趋势相较于 TOC 平缓。由表 3 可见,林地上层土壤 TN 含量范围为 3.83~5.05 mg/g,深层介于 4.03~4.43 mg/g,土壤平均 TN 含量由 4.55 mg/g 下降至 4.20 mg/g,下降幅度为 7.7%;草地上层土壤 TN 含量范围为 2.83~4.93 mg/g,深层介于 1.95~4.78 mg/g,土壤平均 TN 含量由 4.01 mg/g 降至 3.30 mg/g,降幅为 17.7%;耕地上层土壤 TN 含量范围为 1.95~3.05 mg/g,深层介于 1.78~2.53 mg/g,平均土壤 TN 含量由 2.60 mg/g 降至 2.15 mg/g,下降幅度为 17.3%。在不同土地利用类型中大小表现为:林地(4.37 mg/g) > 草地(3.66 mg/g) > 耕地(2.37 mg/g)。

林地、草地,土壤 TP 含量变化区间相对一致,除部分耕地土壤 TP 含量明显高于其他样地外,其他样地变化区间与林地、草地差异不大。由表 3 可见,林地上层土壤 TP 含量范围为 0.30~0.52 mg/g,深层土壤介于 0.25~0.58 mg/g,土壤上层 TP 含量平均值 0.39 mg/g,深层土样的平均值 0.50 mg/g,深层土

壤 TP 含量高于上层;草地土壤样本的 TP 含量变化范围是:0.30~0.56 mg/g,上层土样的平均值 0.42 mg/g,深层土样的平均值 0.38 mg/g;耕地土壤样本的 TP 含量范围为 0.20~2.21 mg/g,上层土样的平均值 0.89 mg/g,深层土样的平均 0.84 mg/g。不同用地类型中,土壤 TP 含量大小表现为耕地(0.86 mg/g) > 林地(0.44 mg/g) > 草地(0.40 mg/g)。

表 3 不同用地类型 TOC, TN, TP 含量 mg/g

土地类型	0—20 cm		20—40 cm		
	含量	平均值	含量	平均值	
TOC	林地	15.18~39.63	25.24	0.93~11.01	5.86
	草地	17.62~55.4	31.64	5.79~15.07	11.19
	耕地	7.3~28.16	18.92	10.08~19.35	14.31
TN	林地	3.83~5.05	4.55	4.03~4.43	4.20
	草地	2.83~4.93	4.01	1.95~4.78	3.30
	耕地	1.95~3.05	2.60	1.78~2.53	2.15
TP	林地	0.30~0.52	0.39	0.25~0.58	0.50
	草地	0.30~0.56	0.42	0.24~0.61	0.38
	耕地	0.20~2.21	0.89	0.26~2.00	0.84

3.3 不同土地利用类型土壤养分流失特征

土壤养分主要依附于土壤颗粒而存在,也随土壤颗粒的流失而流失。有研究表明,土壤¹³⁷Cs 与土壤 TOC, TN 显著相关^[5],本研究中,根据公式(6), (7) 计算不同土地利用类型土壤养分流失量。由表 4 可见,不同土地类型的养分流失有所差异,3 种养分在林地中均出现了沉积,其他两种用地类型内,均为流失状态。3 种用地类型土壤 TOC 流失量分别介于 -4.45~5.82 t/(km²·a), 18.26~40.01 t/(km²·a), 11.58~43.52 t/(km²·a), 平均流失量从大到小为草地[27.87 t/(km²·a)] > 耕地[24.19 t/(km²·a)] > 林地[2.19 t/(km²·a)]; 土壤 TN 流失量分别介于 -2.05~2.32 t/(km²·a), 3.18~7.14 t/(km²·a), 1.90~4.85 t/(km²·a), 平均流失量大小依次为草地[4.80 t/(km²·a)] > 耕地[3.46 t/(km²·a)] > 林地[0.45 t/(km²·a)]; 土壤 TP 流失量分别介于 -0.19~0.28 t/(km²·a), 0.42~0.58 t/(km²·a), 0.37~3.85 t/(km²·a), 与 TOC, TN 不同, TP 平均流失量大小依次为耕地[1.36 t/(km²·a)] > 草地[0.50 t/(km²·a)] > 林地[0.06 t/(km²·a)]。

表 4 不同土地利用类型养分流失

土地类型	TOC/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)		TN/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)		TP/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	
	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
林地	-4.45~5.82	2.19	-2.05~2.32	0.45	-0.19~0.28	0.06
草地	18.26~40.01	27.87	3.18~7.14	4.80	0.42~0.58	0.50
耕地	11.58~43.52	24.19	1.90~4.85	3.46	0.37~3.85	1.36

注:表中负值代表沉积。

综合各用地类型中的土壤侵蚀速率与养分流失特征,由表 5 可见,土壤侵蚀量与土壤碳、氮流失量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$),但与土壤磷流失量

的相关性并不显著;土壤碳流失量与氮、磷两种养分流失量均呈显著的正相关关系($p < 0.05$),氮、磷流失量间并无显著相关性。

表 5 土壤侵蚀量、养分流失量及生态化学计量特征相关性分析

	土壤侵蚀量	TOC 流失量	TN 流失量	TP 流失量	C/N	N/P	C/P
土壤侵蚀量	1						
TOC 流失量	0.799**	1					
TN 流失量	0.837**	0.702*	1				
TP 流失量	0.509	0.691*	0.335	1			
C/N	0.054	0.866**	-0.025	0.287	1		
N/P	-0.268	-0.192	0.008	-0.620**	-0.275	1	
C/P	-0.109	0.669**	-0.028	-0.334	-0.718**	0.377	1

注: ** 表示 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.4 不同土地利用类型对土壤养分生态化学计量特征的影响

由图 1A 可见,多数在样地 C/N 低于 5,少部分介于 5~15。除耕地样地外,林地、草地上层土壤 C/N 明显大于深层土壤,其中林地更为明显。上层土壤较大的 C/N 表明林、草土地类型中土壤上层有机质存在富集现象。在耕地样地中上层与深层土壤 C/N 差异不大,随深度分布相较于其他两种用地类型较为均匀,表明受人类耕作扰动下,上层和深层土壤混合相对均匀。各用地类型 C/N 平均值大小表现为:耕地(6.95) > 草地(6.14) > 林地(3.14)。

由图 1B 可见,不同土地利用方式土壤的 N/P 差别较大,每一种土地利用类型及土层深度 N/P 变化趋势不一。其中草地、耕地土壤上、下层土壤中 N/P 变化相较于林地平缓。土壤 N/P 主要受土壤中磷素含量的制约,另外,由于随着土层深度的增加,磷素的降低速率低于氮素的速率,所以导致 N/P 随着深度变化与土壤 TN 趋势基本一致。样地 N/P 平均值大小表现为:林地(10.99) > 草地(10.07) > 耕地(4.82)。

从图 1C 可见,在滇池流域总体来看,3 种土地利用类型 C/P 随深度变化差异较大,其中林地上层 C/P 明显高于深层土壤 C/P,进一步证明林地上层土壤 TOC 具有明显富集现象;草地 C/P 随深度变化与林地相比较为平缓;耕地 C/P 随深度变化仍较为均匀。3 种土地类型的 C/P 规律表现出:草地(57.47) > 林地(39.94) > 耕地(27.55)。

由表 5 可知,土壤养分生态化学计量特征与土壤侵蚀量之间并无直接的显著相关性。C/N, C/P 与 TOC 流失量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$), N/P 与土壤 TP 流失量呈极显著的负相关关系($p < 0.01$),化学计量特征 C/N 与 C/P 呈极显著的负相关关系($p < 0.01$)。

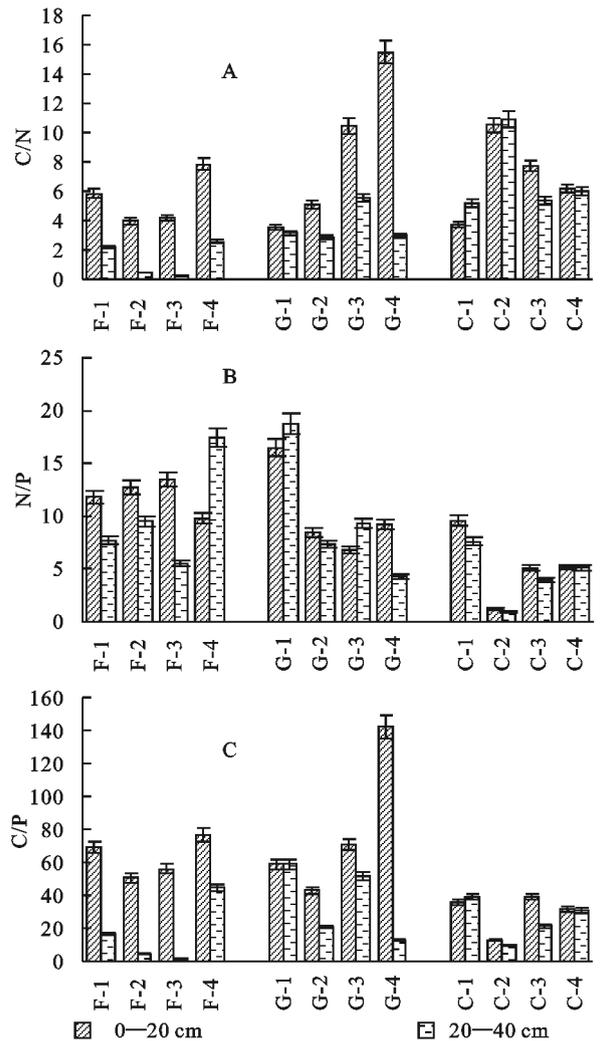


图 1 不同土地利用类型碳氮磷生态化学计量特征

4 讨论

4.1 土壤侵蚀与养分流失

各用地类型侵蚀特征具有较大差异,林地各样点的空间差异较大,主要是研究区内林地多为山坡林地类型,受地形、植被、群落结构等因素影响较大,因此

在不同样地中表现出较大的差异性。而草地空间差异较小。当地草地植被多为林间山坡草地,不具备耕作条件,土壤上下层¹³⁷Cs 含量差异较大,因此排除废弃耕地的次生演替,多数草地为自然生长,同一地理单元内,草地群落结构及优势种差异不大,没有明显的空间差异。与草地相比,耕地土壤平均侵蚀量略高于草地,二者较为接近,可能原因是草地与耕地类似,均呈现季节性变化。但耕地各样点与草地相比差异明显较大,其主要原因是研究区内耕地多为自主开荒,耕地较少且在研究区内分布不均,耕作年限不一,其土壤侵蚀程度表现出较高的空间差异。耕地具有一定的坡度,受人类活动的影响较大,土层扰动剧烈且土壤疏松,间作期间土壤更是直接呈裸露状态,此时最易受降雨影响,造成大量的土壤流失。

不同的用地类型,其覆被植物及覆盖度均有不同。植被覆盖层能够减少雨滴冲击,增加地表粗糙度,减缓地表径流流速,植被枯落物腐烂分解,可进一步增加土壤有机碳的含量,改善土壤理化性质^[15-18]。土壤侵蚀规律为耕地>草地>林地,不同用地类型上的覆被植物对土壤侵蚀影响作用明显,土壤侵蚀规律与受人类扰动程度规律一致,由此表明人类扰动对土壤侵蚀影响也较为明显。土壤侵蚀规律与牛晓音^[5]研究中略有不同,在其研究中草地的土壤侵蚀模数低于林地,其主要原因可能与林龄有关,不同年限的林地水土保持效益不同^[19-20],加上采样的偶然性,因此呈现出不同的规律。我国西南土石山区容许土壤侵蚀量为 500 t/(km²·a)^[21]。在本研究中除林地外,其他土地利用类型侵蚀量远超过容许土壤侵蚀量,约为容许值的 2.6~3.1 倍,由此表明,在研究区内,水土流失虽得到一定控制,但其流失量相对于容许值仍然较大,尤其是草地和耕地需要采取更为严峻的水土保持措施进行水土流失治理。

土壤 TOC, TN 在不同土地利用类型中的流失规律较为一致,均为草地>耕地>林地,虽然整体上土壤 TOC, TN 流失量与土壤侵蚀量具有极显著的正相关关系,但在耕地、草地两种用地类型中,土壤侵蚀模数耕地大于草地,养分流失量为草地大于耕地,与土壤侵蚀规律明显不同,主要原因草地土壤中 TOC, TN 基础质量分数高于耕地,两种土地类型平均土壤侵蚀量相近,因而草地土壤养分流失量大于耕地。土壤 TP 流失量与土壤侵蚀量的关系并不显著,但在不同土地利用类型中,土壤 TP 流失规律与土壤侵蚀规律一致,均表现为耕地>草地>林地。与张

艳^[22]研究中呈现规律相同。草地、耕地相近的土壤流失量下,耕地土壤中 TP 含量高于草地,因此并未出现与 TOC, TN 类似的流失规律。综上,土壤养分流失尤其是碳氮与土壤侵蚀关系密切,且养分依附于土壤,随土壤侵蚀而流失,但各养分在土壤中的基础含量不同,其流失规律也表现出一定的差异性。

4.2 土壤养分垂直分布特征

在林地和草地土壤养分分布主要集中在上层土壤中,主要原因是由于林地、草地中,植物所产生的枯枝、落叶等枯落物连同植物繁杂的根系能够为土壤提供大量的有机碳^[23]。其次林地、草地不易受到人类活动的影响,枯落物长期存在于土壤层表面,而且由于地形、土壤质地等原因有机质难以向深层土壤中迁移。林地、草地土壤上层 TOC 含量较高,呈现出比较明显的表面富集现象,上层和深层土壤中 TOC 含量差异十分明显。而耕地上下层土壤的含量差距不大。这表明深耕、翻耕等行为使得种植作物的土壤充分混合,导致有机碳含量分布较为均匀。土壤覆被类型不同,导致地表凋落物含量、根系发育程度和凋落物分解速率等均存在一定差异,从而造成不同覆被类型下养分输入及土壤理化性质的不同^[24]。同时解释了不同土地利用类型土壤中养分含量的差异^[25]。耕地上层土壤 TOC 含量低于林地、草地,其中的原因可能是耕地在施加人工化肥的同时,也加深了土壤环境的侵蚀程度,使土壤生物、微生物快速生长繁殖,加速有机质分解逸散^[26]。此外,耕地的人为扰动强度远远大于其他土地利用类型,极易导致土壤结构和成分的变化^[27],使土壤侵蚀速度加快,土壤中的有机碳快速流失或释放。以土壤 TOC 含量 11.6 mg/g 作为丰缺指标^[4], 3 种用地类型中,土壤 TOC 普遍较高。根据全国第二次土壤普查标准^[28]可知,草地土壤 TOC 处于 2 级,耕地、林地处于 3 级,就土壤 TOC 而言,3 种用地类型均处于中上水平。

不同土地利用类型土壤氮素来源不同。林地较其他两种土地类型凋落物较多,容易形成连续的林下覆盖层,有利于提高氮元素和有机质的含量,而且氮元素的输入途径可能更加广泛^[29]。而部分草地土样也表现出了较高的氮含量,证明根系使土壤保持氮元素能力有所提高。植物的根系是影响土壤侵蚀的重要因素^[30],植物根系能够提高土壤的抗侵蚀性、抗剪切性以及对于土壤起到锚固等作用^[31]。草地浅层根系更加发达,这使得草地土壤养分保持能力更强。经过土壤中微生物的分解作用促进了土壤氮素的积累。

耕地作为典型的人类活动区域,受外界因素的制约更加明显,氮素的输入更加依赖于人工氮肥的施用,同时由于翻耕等耕作方式的影响,易造成氮肥的转化挥发,逸散到大气中造成氮肥损失。以土壤 TN 含量 1.00 mg/g 为丰缺指标^[4],并结合全国第二次土壤普查标准^[28],3 种土地利用类型中土壤 TN 均属 1 级,处于较高水平。

土壤 TP 垂直变化较小,可能原因是磷素在地壳中迁移量较小^[32],在同一地域内,磷素空间及深度分布并无明显差异。由表 4 可知,林地深层土壤 TP 含量大于上层,综合林地土壤及养分侵蚀情况,林地土壤 TP 流失量较小,由此可推断林地植物对 P 的利用率较高,也揭示了林地土壤 TP 流失量与土壤侵蚀量相关性较低的原因。耕地 TP 含量高于其他两种土地利用类型,且分布并不均匀,主要是化肥的施加造成短时间内土壤磷素的增加,加上耕作措施及时间的不同,空间分布并不均匀。在土壤侵蚀量接近的情况下,土壤中较高的 TP 含量致使耕地 TP 流失量也明显高于草地、林地。各用地类型中,土壤 TP 含量明显低于丰缺指标 1.50 mg/g ^[4],但是由全国第二次土壤普查标准^[28]可知,耕地处于 2 级,属于良好水平;林地、草地处于 4 级,属于较低水平。

4.3 土壤养分生态化学计量特征

土壤 C/N 它是反映土壤质量评价的敏感指标,较低的 C/N 能够推进微生物的生命活动以及土壤有机质矿化作用^[25,33-36]。林地平均 C/N 低于草地、耕地,表明林地对土壤改良作用更为明显,有助于 C、N 的积累^[25],与土壤 TOC 含量及 C/N 结果一致,尤其是林地上层土壤中,具有明显的 C 富集现象。不同土地类型中,C/N 的差异表明了土地利用方式的变化对土壤 C/N 具有一定的影响。3 种土地利用类型 C/N 均小于中国亚热带平均值(12.1)^[37],表明土壤有机质具有更快的矿化速率,在植物生长过程中,能够保证土壤养分的供应。林地、草地的 N/P 高于亚热带土壤 N/P 平均值(6.4)^[37],但 3 种土地利用类型均低于 14,植物生长主要受 N 影响^[38]。土壤 C/P 高低对植物生长发育具有重要的影响^[25]。C/P 上下层差异在林地、草地中表现较为明显,也表明上层 C 含量较高,出现富集现象。C/N、C/P 数值大小受土壤 TOC 含量主导。耕地 C/P 相对林地、草地较低,表明耕地 P 素有效性较高,耕地受人类影响较大,化肥的使用使土壤有效磷含量高于自然水平。我国亚热带土壤的 C/P 为 78^[37]。本研究的 3 种用地类型平

均 C/P 均低于该值,表明研究区内土壤中 P 素可利用性较高。土壤侵蚀与土壤养分化学计量特征并无直接相关性,但与 TOC、TP 流失量密切相关,可能是土壤养分在不同样点中分布各有差异,土壤侵蚀的空间差异性受用地类型影响。土壤侵蚀与土壤养分化学计量特征均与养分流失密切相关,由此可推断,土壤侵蚀通过影响养分流失,可能对化学计量特征产生间接影响。

5 结论

(1) 不同土地利用方式影响土壤侵蚀程度,研究区土壤侵蚀大小关系表现为耕地 $[1\ 538.74 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >草地 $[1\ 308.82 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >林地 $[81.88 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$,3 种用地类型下平均侵蚀处于轻度侵蚀到中度侵蚀之间,草地、耕地土壤侵蚀模数约是当地容许土壤侵蚀量的 2.6~3.1 倍,土壤侵蚀现象依然严重。

(2) 不同土地利用方式对土壤养分含量分布和流失量具有一定影响,土壤侵蚀与养分流失关系密切。TOC、TN、TP 流失量大小分别为草地 $27.87 \text{ t}/[\text{km}^2 \cdot \text{a}]$ >耕地 $[24.19 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >林地 $[2.19 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$;草地 $[4.80 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >耕地 $[3.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >林地 $[0.45 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$;耕地 $[1.36 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >草地 $[0.50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ >林地 $[0.06 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$,林地中 3 种养分的流失量均为最小,反映出林地对土壤侵蚀及养分流失减缓程度明显。并且 3 种土地利用类型中,除林、草地土壤 TP 处于 4 级水平外,其他养分均处于 3 级以上水平,表明土壤虽受侵蚀影响但养分状况仍相对良好。

(3) 土壤养分化学计量特征与土壤侵蚀并无直接关系,但土壤侵蚀通过影响养分流失进而对土壤化学计量特征产生影响。土壤 C/N 为耕地(6.95)>草地(6.14)>林地(3.14);土壤 N/P 为林地(10.99)>草地(10.07)>耕地(4.82);土壤 C/P 为草地(57.47)>林地(39.94)>耕地(27.55),较低的 C/N 和 C/P 表明土壤有机质矿化速率较快,并且磷的有效性较高,较低的 N/P 表明植被生长在一定程度上主要受 N 元素影响。

参考文献:

- [1] Ekholm P, Lehtoranta J. Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012,93(1):140-146.
- [2] 白振华,张秀玲,段艺芳,等.土地利用/覆被变化对土壤质量影响研究进展[J].*世界科技研究与发展*,2009,31(4):682-685.

- [3] 刘彦随,陈百明.中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J].地理研究,2002,5(3):324-330.
- [4] 陈春瑜,和树庄,胡斌,等.土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响[J].应用生态学报,2012,23(10):2677-2684.
- [5] 牛晓音,王延华,杨浩,等.滇池双龙流域不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分分异[J].环境科学研究,2014,27(9):1043-1050.
- [6] 崔骏.滇北小流域不同土地利用下土壤侵蚀与养分流失研究[D].南京:南京师范大学,2017.
- [7] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等.中国¹³⁷Cs本底值区域分布研究[J].核技术,2006,29(1):42-50.
- [8] Walling D E, He Q. The global distribution of bomb-derived ¹³⁷Cs reference inventories [R]. Final Report on Iaea Technical Contract 1036/Ro-R1. Exeter: University of Exeter Press, 2000.
- [9] 张燕,彭补拙,陈捷.¹³⁷Cs示踪法估算滇池流域土壤侵蚀[J].核农学报,2005,19(2):125-128.
- [10] 张明礼,杨浩,王小雷,等.中国季风区土壤¹³⁷Cs背景值研究[J].核农学报,2009,23(4):669-675.
- [11] Xinbao Z, Higgitt D L, Walling D E, et al. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 1990,35(3):243-252.
- [12] 张明礼,杨浩,高明,等.利用¹³⁷Cs示踪技术研究滇池流域土壤侵蚀[J].土壤学报,2008,45(6):1017-1025.
- [13] 张燕,张洪,彭补拙,等.不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失[J].水土保持通报,2003,23(1):23-26.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 黄承庆.庆远不同植被类型地表径流的初步研究[J].广西林业科技,1992,21(2):51-55.
- [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[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):72-77.
- [17] 张建萍,杨树华,王宝荣.抚仙湖流域磷矿区主要植物群落水土保持效应研究[J].西部林业科学,2004,33(2):76-80.
- [18] 喻勇.基于界面理论的城市绿地系统对水质环境影响研究[D].江苏苏州:苏州科技学院,2010.
- [19] 王燕,宫渊波,尹艳杰,等.不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J].水土保持学报,2013,27(5):23-27,31.
- [20] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):191-197.
- [21] 中华人民共和国水利部. SL 190-96 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [22] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):12-17.
- [23] 罗佳.枫香人工林凋落物分解速率及其对土壤养分的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2009.
- [24] 张华渝,王克勤,宋娅丽,等.滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征[J].水土保持研究,2019,26(3):16-21.
- [25] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.
- [26] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.
- [27] 尚河英,尹忠东,张鹏.川中不同类型小流域土壤侵蚀特征分析[J].水土保持研究,2015,22(5):5-8.
- [28] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [29] 宋一民.滇池东南小流域不同土地利用下土壤侵蚀及营养盐流失影响研究[D].南京:南京师范大学,2018.
- [30] 李瑞霞.间伐对马尾松细根生物量、形态和碳氮含量的影响[D].南京:南京林业大学,2014.
- [31] 娄会品,高甲荣.京郊琉璃河河岸带土壤生物工程的生态效应[J].西北林学院学报,2016,31(1):304-308.
- [32] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [33] 刘玉萍,陈西,王延华,等.滇池流域土壤养分分布及其对水体富营养化的影响[J].南京师大学报:自然科学版,2017,40(4):129-136.
- [34] 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.
- [35] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003,35(4):629-632.
- [36] 陶冶,吴甘霖,刘耀斌,等.吉尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J].中国沙漠,2017,37(2):305-314.
- [37] 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):139-151.
- [38] 戚德辉,温仲明,王红霞,等.黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J].生态学报,2016,36(20):6420-6430.