

DOI: 10.5846/stxb202107242001

张宁宁, 黄诗浩, 雷衡, 雷欣哲, 刘普灵, 亢福仁. 基于¹³⁷Cs 示踪技术的土壤侵蚀及养分流失特征评价. 生态学报, 2022, 42(22): 9274-9283.

Zhang N N, Huang S H, Lei H, Lei X Z, Liu P L, Kang F R. Assessment of soil erosion and nutrient loss characteristics based on ¹³⁷Cs tracer technique. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9274-9283.

基于¹³⁷Cs 示踪技术的土壤侵蚀及养分流失特征评价

张宁宁^{1,*}, 黄诗浩¹, 雷 衡¹, 雷欣哲¹, 刘普灵², 亢福仁¹

1 榆林学院生命科学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 榆林 719000

2 中国科学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, 杨凌 712100

摘要: 研究不同土地利用方式对小流域土壤侵蚀及其养分流失特征的影响有助于更好的理解土地利用方式变化引发的环境效应问题, 对区域生态保护和高质量发展具有重要意义。选择陕北延安市湫沟小流域为研究对象, 利用¹³⁷Cs 示踪技术, 定量评价了不同土地利用方式的土壤侵蚀和养分流失状况及其相互变化关系, 结果表明: (1) 土地利用方式显著影响小流域土壤侵蚀状况。土壤侵蚀模数介于-18.67—151.27 t km⁻² a⁻¹之间, 大小顺序为沟道>苹果园>林地>草地>灌木, 均为微度侵蚀。其中, 除灌木地发生沉积以外, 其它土地利用方式均发生了土壤侵蚀现象。(2) 不同土地利用方式下的土壤侵蚀模数空间变异明显, 除沟道为轻度变异以外, 其它土地利用均为中等变异。(3) 土壤全氮含量、有机质含量、N/P 比和 C/P 比在不同土地利用方式下的变化特征表现一致, 大小顺序均为灌木>草地>林地>沟道>苹果园, 且在不同利用方式间均存在显著性差异。但全磷含量表现为灌木>苹果园>沟道>草地>林地, 且与土壤全氮含量和有机质含量极显著正相关。同全国平均水平相比, 土壤全氮含量偏低, 全磷含量适中; C/N 超过全国平均水平, 而 N/P 和 C/P 远低于全国平均水平, 小流域土壤氮限制严重。(4) 土壤侵蚀是该小流域养分流失的重要诱因。不同土地利用方式土壤养分流失变化特征与土壤侵蚀模数表现一致, 且两者呈极显著正相关关系; 但与土壤全氮、全磷、有机质、N/P 比及 C/P 比呈极显著负相关关系, 与 C/N 比关系不显著。

关键词: 典型小流域; 土地利用方式; ¹³⁷Cs 示踪技术; 侵蚀特征; 养分流失

Assessment of soil erosion and nutrient loss characteristics based on ¹³⁷Cs tracer technique

ZHANG Ningning^{1,*}, HUANG Shihao¹, LEI Heng¹, LEI Xinzhe¹, LIU Puling², KANG Furen¹

1 College of Life Sciences, Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China

Abstract: Land use plays a pivotal role in the soil erosion process in small watersheds. The focus of most studies was on the soil erosion or soil nutrient distribution. However, there was limited information about the relationship between them. Nonetheless, it is important in understanding the environmental effects, and of great significance for regionally ecological protection and high-quality development. Given that the research in this area was lacking, this study quantitatively evaluated the characteristics of soil erosion and nutrient loss characteristics and their relationship. The Qiugou Watershed was selected as the study area, which is located in Yan'an city of northern Shaanxi Province in China, the ¹³⁷Cs tracer technique was selected as the research technique. The results could be drawn as follows: (1) land use patterns significantly affected soil erosion in the small watershed. The soil erosion modulus ranged from -18.67 t km⁻² a⁻¹ to 151.27 t km⁻² a⁻¹. The degree of soil erosion under all land use patterns was slight. The value from high to low was gully, apple orchard,

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目专项项目 (19JK1000); 国家自然科学基金项目 (42067016, 41371281)

收稿日期: 2021-07-24; **网络出版日期:** 2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangningning1986@163.com

woodland, grassland, and shrub. The soil erosion was observed in the all study sites with one exception where deposits occurred in the shrub land. (2) The spatial variation of soil erosion modulus under different land use was obvious, and the variation of other land uses was moderate except slight for gully. There were significant differences in erosion modulus between forest and apple orchard, shrub and gully, and between shrub, apple orchard and gully, but there was no significant difference between forest and grassland. (3) The trend of soil total nitrogen content, organic matter content, N/P and C/P were consistent under different land use patterns, and the order was shrub, grassland, woodland, gully, and apple orchard. However, the total phosphorus content showed different change characteristics. The value from high to low was shrub, apple orchard, gully, grassland, and woodland. Soil total phosphorus content was highly significant with soil total nitrogen content and organic matter content. Compared with the national average, soil total nitrogen content was lower, and soil total phosphorus content was moderate. C/N was higher than the national average, while N/P and C/P were much lower than the national average, indicating that soil nitrogen was the severely restricted factor in present small watershed. (4) Soil erosion was an important cause of nutrient loss in this small watershed. The soil nutrient loss, soil nutrient status and soil erosion degree, by and large, following a close relation. Chang of soil nutrient loss in different land uses was consistent with the performance of soil erosion modulus, and there was highly significantly positive correlation between them. However, it was negatively correlated with soil total nitrogen, total phosphorus, organic matter, N/P ratio and C/P ratio, but not with C/N ratio. This study provided data support for the high-quality development of the Loess Plateau and the prevention and control of regional soil erosion in the new period.

Key Words: typical small watershed; land use type; ¹³⁷Cs tracer technique; erosion characteristics; nutrient loss

土地利用方式是小流域水土流失重要的影响因素之一,分析土地利用格局演变条件下的土壤侵蚀规律是水土流失研究的热点^[1]。很多学者针对新侵蚀环境背景下的小流域土地利用方式变化及其土壤侵蚀及养分分布响应开展了大量的研究工作,特别是在土地利用方式演变及其对植被覆盖^[2]、微地形^[3]、土壤理化性质^[4]和土壤侵蚀动力^[5]等方面的影响研究取得了丰硕成果。但这些研究多数仅关注流域内土壤侵蚀或土壤养分分布特征,很少同时关注两者变化。同时已有研究表明小流域不同土地利用方式的土壤侵蚀强度差异显著,且区域间差别较大^[6],而养分流失与土壤侵蚀密切相关。因此,以小流域为研究单元,综合定量评价不同土地利用方式的土壤侵蚀和养分流失状况及其相互关系有待进一步深化。

黄土高原丘陵区是黄河粗泥沙来源的重要区域,生态极度脆弱,是黄河流域高质量发展的重要影响区域^[7]。多年来,以小流域为单元的综合治理模式与实践使其土地利用格局发生了显著变化,同时对区域土壤侵蚀及养分分布格局产生了重大影响^[8-9]。特别是退耕还林草工程的大面积实施导致黄土高原土地利用方式产生了显著的变化,植被覆盖显著提高,相应的土壤养分分布和土壤侵蚀特征也发生了显著的变化^[10-12],因此,研究该区域土地利用方式变化下的土壤侵蚀与养分流失状况,对理解新侵蚀环境背景下的环境变化具有重要意义。

目前,有关于小流域土壤侵蚀定量评价的方法也较为多样,常见的方法包括模型法、沉积物反演以及示踪法^[13-16]等,其中,示踪技术因其简便、经济、精确度高,可靠性强,已被大量用于区域土壤侵蚀的研究中^[17-20]。鉴于此,本文选择黄土丘陵区典型小流域,运用¹³⁷Cs 示踪技术,对小流域内不同土地利用方式下的土壤侵蚀与沉积状况进行定量分析和评价,并以此为基础定量研究小流域土壤养分流失特征,同时,通过土壤养分生态化学计量特征揭示土壤养分水平。旨在以小流域为研究单元,综合定量评价不同土地利用方式的土壤侵蚀和养分流失状况,揭示土地利用方式对土壤侵蚀和养分流失的影响,为新时期黄土高原高质量发展以及区域水土流失防治提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为湫沟小流域,属于延安燕沟流域的一条支沟,地理位置为 $36^{\circ}28'12''\text{N}$, $109^{\circ}32'36''\text{E}$, 海拔 1131 m(图 1)。该地区的气候特征为半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量为 423 mm,主要集中在 7—9 月份,且多为暴雨。研究区 50 多年来土地利用以耕地为主,小流域退耕以前经过了基本农田(梯田)建设工程,从 2000 年开始大规模实施退耕还林还草工程,2002 年退耕结束后小流域内包含多种土地利用方式,土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主,土壤类型为黄绵土。

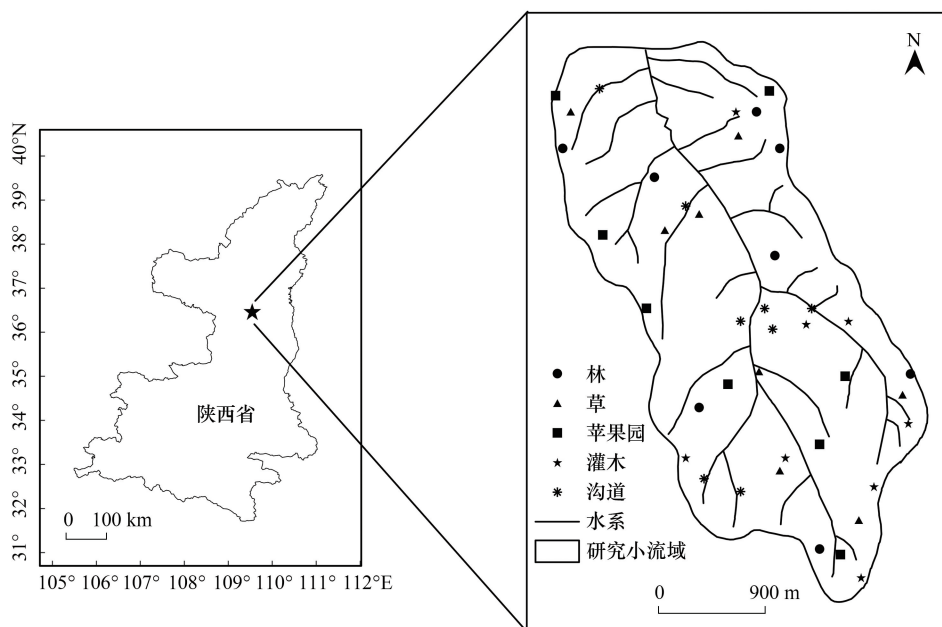


图 1 研究区和采样点分布图

Fig.1 Study area and sampling points distribution

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集和制备

(1) ^{137}Cs 背景值样品的采集与确定

研究区 ^{137}Cs 背景值选取的原则是选择未扰动且侵蚀轻微或者无侵蚀的老坟地或非农耕地,采集点位于研究区附近,保证土壤剖面中 ^{137}Cs 含量均匀分布。该研究小流域中,由于地形破碎,水力侵蚀严重,且研究小流域先后经历小流域综合治理,退耕还林还草等强烈的人为扰动改变了小流域的土地利用方式,已有研究表明,山顶非耕作土不宜作为背景值的理想选址。经过调查,发现该流域内的一处老坟地未发生过明显的人为扰动,因此作为背景值的采样地点。采样时按照 10 cm 的间隔分层采集 0—20 cm 土壤样品,采用内径为 9 cm 的土钻,总采集样品个数为 8 个。结果得出研究区的背景值为 1567 Bq/m^2 ,通过查阅资料,此背景值在黄土高原 ^{137}Cs 实测背景值的范围之内^[21]。因此,本研究确定的 ^{137}Cs 背景值 1567 Bq/m^2 是可信的,用来定量估算当地研究小流域的土壤侵蚀状况。

(2) 不同土地利用方式表层土壤样品的采集

依据小流域的五种主要土地利用方式(林地、灌木、草地、苹果园、沟道)进行样点布设,每种土地利用方式结合其在小流域的分布位置沿径流方向选择 8 个典型样点确定为采样样地。采样时,使用内径为 9 cm 的土钻在样地中按照“S 型”进行土壤样品的采集,采集表层 20 cm 的土壤,每个样点的样品由样地内平行的 6—

8 处土壤混合而成。同时在采样的过程中使用 GPS 定位记录采样点的位置信息。

(3) 样品的制备

采集的土样带回实验室,除去石块、根系、动植物残体等杂物,经风干(平铺在干净的牛皮纸上,在阴凉通风处风干)、去处碎石和根系后研磨、分别过 0.25 mm 和 2 mm 筛,其中,0.25 mm 土壤样品用于土壤养分含量的测定,2 mm 土壤样品称量 150 g 左右装入 ¹³⁷Cs 测定样品盒中,盖紧备用。

1.2.2 指标测定与计算

(1) 土壤侵蚀模数计算

将制备好的土壤样品利用美国 ORTEC 公司生产的 8192 道低本底 γ 能谱仪,测定在 661.6 keV 处 ¹³⁷Cs 全能峰净面积,所有样品测量时间都为 8 h(28800 s)。采用全峰面积法对峰面积进行计算,比活度运用标准源相对比较法得出。采用张信宝等^[17]构建的模型计算土壤侵蚀模数。

(2) 土壤养分含量和容重的测定

土壤全氮的测定采用的是瑞士 FOSS TECATOR 生产的全自动凯式定氮仪测定。全磷采用分光光度计测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,土壤容重采用环刀法测定,每个指标测定均设三个重复。

(3) 土壤有机质、全氮(TN)、全磷(TP)的流失量计算

单位面积土壤养分流失量采用张燕等^[22]建立的模型计算。

$$L_i = N \times D_i \times h_i$$

式中, L_i 为养分的流失量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$); N 为养分在土壤中的含量(g/kg); 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)。

$$L_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

式中, L_A 为平均养分流失量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$); L_i 为 i 采样点的养分流失量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$); n 为样点数量。

1.2.3 数据处理与分析

实验所得到的数据在 Excel 2007 进行整理计算,利用 SPSS 23.0 软件的单因素方差分析法对数据进行方差分析和多重比较,使用 origin 8.5 和 arcgis 10.0 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式的土壤侵蚀特征

研究小流域灌木、沟道、苹果园、林地、草地的侵蚀模数值分别分布在 $-18.67 \sim -9.38 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $109.76 \sim 151.27 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $72.24 \sim 144.20 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $31.37 \sim 58.63 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $18.15 \sim 56.18 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间。整体上,研究小流域土壤侵蚀模数介于 $-18.67 \sim 151.27 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间,均为微度侵蚀,但不同土地利用方式之间差异显著(图 2)。土壤侵蚀模数除灌木地为负值($-13.35 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$),发生了沉积以外,草地、林地、苹果园、沟道均发生侵蚀,平均值从大到小依次为沟道($128.15 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)>苹果园($102.86 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)>林地($45.91 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)>草地($35.06 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

研究小流域内土壤侵蚀模数除沟道为轻度变异以外,其他土地利用均为中等变异(表 1)。其中,林地和草地与苹果园、灌木、沟道之间,灌木、苹果园和沟道之

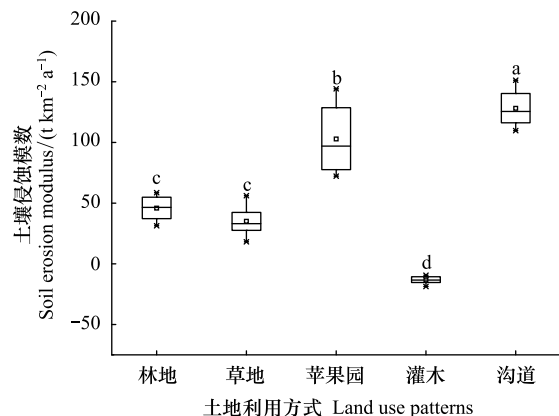


图 2 不同土地利用的土壤侵蚀模数分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil erosion modulus in different land-use types

不同小写字母表示在不同土地利用方式间差异显著 ($P < 0.05$)

间的侵蚀模数均存在显著性差异($P<0.05$),但林地和草地之间差异不显著($P>0.05$)。

表 1 小流域不同土地利用方式土壤侵蚀模数方差分析和多重比较

Table 1 Variance analysis and multiple comparison of soil erosion modulus for different land-use types in small watershed

土地利用 Land use	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient
林地 Forest	45.91c	10.00	21.79%
草地 Grassland	35.06c	12.11	34.56%
苹果园 Apple orchard	102.86b	27.70	26.93%
灌木 Shrub	-13.35d	3.20	23.94%
沟道 Channel	128.15a	15.00	11.71%
F 值	101.51 **		

表中带“**”的表示在 99%水平上差异极显著

2.2 不同土地利用方式的土壤养分分布特征

土壤全氮含量和有机质含量在不同土地利用方式下的分布特征表现一致,均表现为灌木>草地>林地>沟道>苹果园,而土壤全磷含量由高到低的顺序为灌木>苹果园>沟道>草地>林地(图 3)。灌木地土壤全氮含量和有机质含量均显著高于其他土地利用方式($P<0.05$),其中,全氮含量分别比草地、林地、沟道和苹果园高 110.6%、115.8%、74.2%和 58.6%,有机质含量分别高 79.0%、89.6%、113.3%和 132.8%;但两种养分在林地和草地以及沟道和苹果园之间差异均不显著($P>0.05$)。灌木地全磷平均含量为 0.64 g/kg,显著高于林地、草地和沟道,但与苹果园之间差异不显著,且其他四种样地之间均未表现出显著的差异性($P>0.05$)。

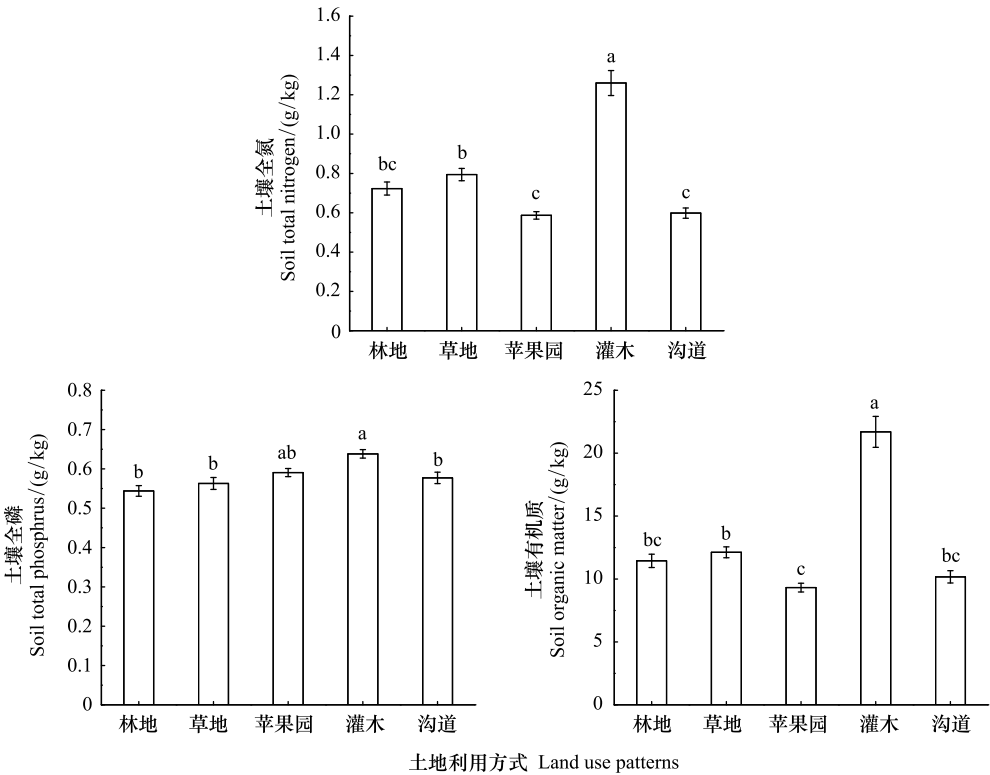


图 3 不同土地利用方式下土壤养分分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of soil nutrients under different land-use patterns

2.3 不同土地利用方式的土壤养分生态化学计量特征

土壤 C/N 比在不同土地利用方式上大小顺序为灌木(17.37)>沟道(17.30)>林地(16.06)>苹果园(15.89)>草地(15.43),但差异不显著($P>0.05$)(图 4)。土壤 C/P 比和 N/P 比在不同用地利用方式下的变

化特征表现一致,大小顺序均为灌木>草地>林地>沟道>苹果园。土壤 C/P 比分布于 9.20—19.76 之间,土壤 N/P 比分布于 0.998—1.98 之间。灌木地土壤 C/P 比显著高于其他土地利用方式($P<0.05$),但林地和草地之间,苹果园和沟道之间差异不显著($P>0.05$);土壤 N/P 比不同土地利用方式的差异性与土壤 C/P 比相似。

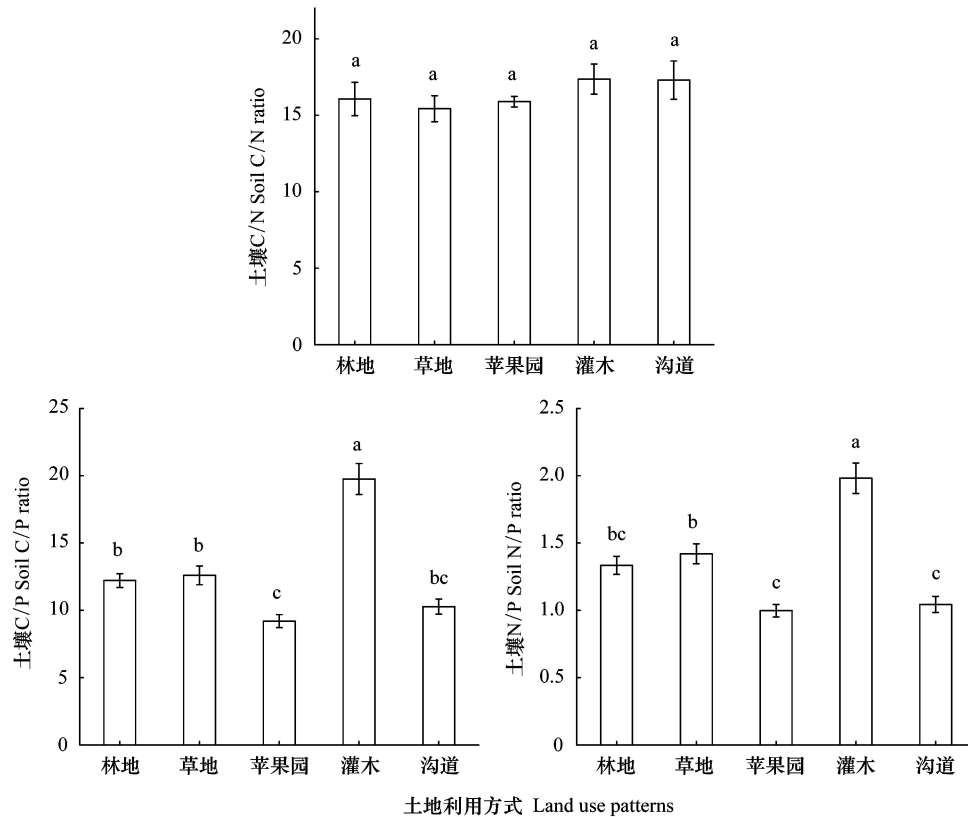


图 4 不同土地利用的土壤养分生态化学计量特征

Fig.4 Ecological stoichiometric ratio of soil nutrients in different land-uses

2.4 土壤侵蚀模数与土壤养分和养分化学计量相关性分析

研究小流域土壤侵蚀模数与土壤全氮、全磷、有机质、N/P 比和 C/P 比之间均呈现显著负相关关系($P<0.01$),相关系数分别为-0.86、-0.45、-0.86、-0.82 和-0.81,但与 C/N 比相关性不显著($P>0.05$)(表 2)。除土壤 C/N 比以外,土壤全氮与全磷、有机质、N/P 比和 C/P 比之间均呈现极显著正相关关系($P<0.01$);土壤全磷与全氮和有机质呈现极显著正相关($P<0.01$),但与土壤侵蚀模数和养分化学计量之间相关性不显著($P>0.05$);土壤有机质与土壤侵蚀模数、全氮、全磷及养分化学计量土壤养分化学计量之间均呈现显著相关关系($P<0.05$)。土壤养分化学计量相关关系表现为:土壤 C/N 比与 C/P 比,以及 N/P 比与 C/P 比之间显著正相关,但土壤 C/N 比与 N/P 比相关不显著。

2.5 土壤养分流失在不同土地利用方式上分布特征

不同土地利用方式的土壤全氮流失量、全磷流失量及有机质流失量变化特征表现一致,均在灌木地中表现为沉积状态,其他土地利用方式为流失状态(图 5)。五种不同的土地利用方式全氮流失量、全磷流失量及有机质流失量均表现为沟道>苹果园>林地>草地>灌木,其中土壤全氮流失量在林地、草地、苹果园、灌木和沟道的分布范围分别为 $0.20\text{--}0.52\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $0.17\text{--}0.45\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $0.40\text{--}0.87\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $-0.20\text{--}-0.13\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $0.61\text{--}1.02\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$;土壤全磷流失量的分布范围分别为 $0.17\text{--}0.34\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $0.09\text{--}0.30\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $0.43\text{--}0.87\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $-0.13\text{--}-0.06\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $0.61\text{--}0.93\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$;土壤有机质流失量的分布范围分别为 $2.86\text{--}7.48\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $2.36\text{--}7.50\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $6.26\text{--}13.84\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $-4.13\text{--}-1.99\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 11.35--

16.31 t km⁻² a⁻¹。三种养分流失量在不同土地利用方式下的差异性分布表现一致,即沟道、苹果园、灌木和林地及草地之间差异显著($P<0.05$),但林地和草地之间无显著差异($P>0.05$)。

表 2 土壤侵蚀模数与土壤养分及养分化学计量之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil erosion modulus and soil nutrients and stoichiometry ratio							
	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	有机质 Organic matter	C/N	C/P	N/P
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	1	-0.86 **	-0.45 **	-0.86 **	-0.09	-0.82 **	-0.81 **
全氮 Total nitrogen		1	0.38 **	0.90 **	-0.11	0.88 **	0.97 **
全磷 Total phosphorus			1	0.42 **	0.08	0.23	0.16
有机质 Organic matter				1	0.32 *	0.98 **	0.85 **
C/N					1	0.34 *	-0.15
C/P						1	0.87 **
N/P							1

表中 * 和 ** 分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)

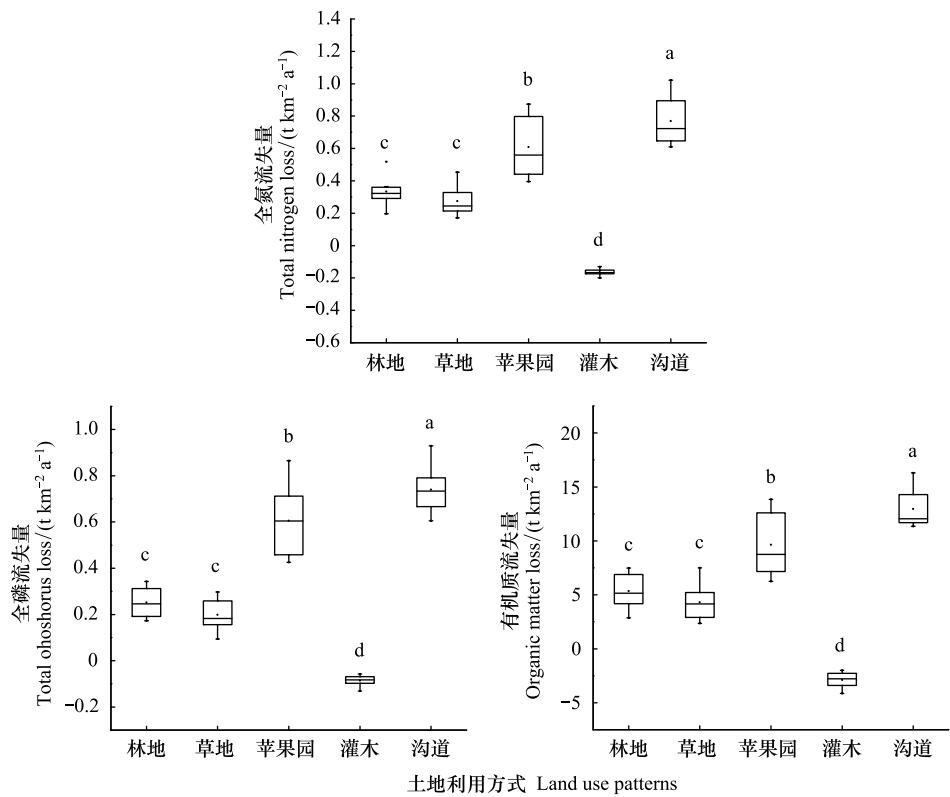


图 5 不同土地利用方式的土壤养分流失量分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of soil nutrient loss under different land-use patterns

2.6 土壤养分流失量与土壤侵蚀、土壤养分及养分化学计量之间的相关分析

相关分析表明:研究小流域土壤全氮流失量、全磷流失量和有机质流失量三者之间呈极显著正相关关系($P<0.01$),三者与土壤侵蚀模数、土壤全氮、全磷、有机质、C/P 比和 N/P 比之间相关性表现相同,均呈现极显著负相关关系($P<0.01$),但与 C/N 比相关性均不显著($P>0.05$)(表 3)。

表 3 土壤养分流失量与土壤侵蚀、土壤养分及养分化学计量之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil nutrient loss and soil erosion modulus and soil nutrients and stoichiometry ratio

	全氮流失量 Total nitrogen loss	全磷流失量 Total phosphorus loss	有机质 流失量 Organic matter loss	土壤侵 蚀模数 Soil erosion modulus	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	有机质 Organic matter	C/N	C/P
全氮流失量	1	0.97 **	0.97 **	0.98 **	-0.82 **	-0.49 **	-0.86 **	-0.17	-0.81 **
全磷流失量		1	0.97 **	0.99 **	-0.87 **	-0.38 **	-0.87 **	-0.09	-0.84 **
有机质流失量			1	0.98 **	-0.86 **	-0.50 **	-0.83 **	0.01	-0.78 **

表中 * * 表示在 99% 水平上极显著相关

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤侵蚀和土壤养分流失的影响

小流域不同土地利用方式显著影响了小流域的土壤侵蚀模数和土壤养分流失状况,均表现为沟道>苹果园>林地>草地>灌木。整体上农业耕作地的侵蚀和养分流失大于未耕作土壤,表明农业耕作对土壤侵蚀的影响显著。该结果与史佳良等^[23]研究次降雨过程中北京市不同土地利用方式下(草地、农田、林地和果园)土壤养分流失的结果(泥沙氮磷流失总量均草地>农田>林地>果园)不同。分析表明史佳良等^[23]的研究是基于单次降雨得出的结果,而本研究小流域的土壤侵蚀和土壤养分流失是多年平均结果。人工灌木林地多数位于人工梯田最低台阶以及沟沿线上的坡地上,密度较大,且采样避开了靠近沟沿线的位置。沟沿线以上坡面侵蚀的泥沙被密集根系拦阻^[24],促进了坡面侵蚀泥沙的沉积,且已有研究显示人工植被在减蚀能力方面灌木表现较好^[25],因此灌木地土壤侵蚀模数为负数。沟道受降雨径流影响,且持续的降雨和坡面来水对沟壁不断打击和冲刷,促进了沟壁土壤结构的破坏^[26],大大的增加了重力侵蚀发生的可能性,导致沟道土壤侵蚀和养分流失明显;苹果园多年受人为耕作的影响,虽然耕作形式都采用了等高穴值,但由于林下土壤疏松,无植被覆盖,易受降雨影响,造成土壤流失,同时促进土壤养分的流失,因此土壤侵蚀和养分流失量较大;草地多为退耕后的自然荒坡地,受地形、植被等多种因素的影响,而林地多为退耕的人工林地,不受人为干扰,但以刺槐为主,林分单一,因此草地和林地均存在微度的土壤侵蚀和养分流失状况。土壤养分流失量与土壤侵蚀表现为极显著正相关关系,而与土壤全氮、全磷、有机质、N/P 比及 C/P 比呈极显著负相关关系,但与 C/N 比关系不显著,即小流域土壤养分流失与养分及土壤侵蚀均关系密切,但相关系数各不相同,特别是与全磷的相关系数相对较低,说明小流域土壤养分流失与碳氮和土壤侵蚀更为紧密,这是由于不同养分在土壤中的基础含量不同,因此其流失规律也相应的表现不同,且土壤侵蚀通过影响土壤养分的流失而对小流域土壤养分分布及化学计量产生影响。

3.2 土地利用方式对土壤养分分布及养分生态化学计量特征的影响

不同土地利用方式显著影响了土壤的全氮含量、全磷含量和有机质含量的分布特征。土壤全氮含量和有机质含量分布表现一致,由高到低的顺序为灌木>草地>林地>沟道>苹果园。根据全国第二次土壤普查标准^[27],研究小流域土壤全氮含量整体处于中下水平,其中林地、苹果园和沟道均表现为五级,草地为四级,灌木为三级;土壤有机质含量灌木地等级为三级,林地和草地为四级,沟道和苹果园为五级。研究小流域的灌木林多为人工退耕地,灌木种植密度较大,且林下有杂草分布,几乎无裸露地面,属于较高植被覆盖的土地利用^[28],人类活动干扰少,多年来植物残体和枯枝落叶物积累在土壤表层,腐质化作用明显,土壤全氮和有机质含量较高,因此,灌木地中的全氮含量和有机质含量显著高于其他土地利用方式(图 2)。草地多为分布于流域沟沿线以上的梯田边坡和沟沿线以下陡峭的坡上,虽然人为干扰较小,但植被覆盖稀疏,而林地亦是如此,由于坡面角度较大,林下植被覆盖差异较大^[29],地表裸露比较明显,水土流失影响较大;因此,草地和林地的全氮和有机质含量相比灌木受侵蚀影响大导致含量降低。沟道长年被径流冲刷侵蚀^[30],沟道两侧重力侵蚀

明显,而苹果园因多年耕作,受人为因素干扰较多,均显著影响其全氮含量和有机质含量积累,表现为在小流域内较低的含量分布。小流域的土壤全磷含量整体处于中等水平,且不同土地利用方式的土壤全磷含量相对均匀,仅灌木地含量与其他样地之间的差异达到了显著水平。这是由于土壤的全磷含量主要与土壤母质有关^[31],研究小流域为黄土母质,且由于小流域除苹果园以外,其他土地利用均处于封育状态,无外部施加磷肥状况。而苹果园虽然施用磷肥,但苹果树对磷的需求极大,且施肥主要是穴施,多数磷肥被植物直接吸收利用^[32]。

土壤的 C/N 和 C/P 是土壤有机质矿化速率和有机质磷矿化释放或吸收固持能力的重要指标。研究区土壤 C/N 在不同土地利用方式的土壤中均超过了我国陆地土壤的平均值 11.9^[33],表明小流域土壤有机质分解速率和养分矿化速率较低,相比有机质,土壤更缺少氮^[34],这是由于本区域为退耕还林草示范区,多为人工植被,其土壤微生物活性和土壤酶活性均较差,影响了有机质的分解和养分的矿化^[35]。研究区土壤 C/P 均低于我国陆地土壤的平均值 61^[33],结合 C/N 结果以及土壤全磷含量表明,研究区内磷元素并非是影响土壤质量的限制性因素。土壤 N/P 作为衡量土壤养分限制阈值的重要指标,对评价土壤质量具有重要意义。研究显示,区域内土壤 N/P (0.99—1.98) 远低于我国陆地土壤的 5.2^[33],且与养分之间均呈现显著正相关关系,结合土壤全氮及全磷含量,说明研究区内土壤受到氮限制严重。综上所述,研究区内土壤 C/P、C/P 和 N/P 分别受土壤有机质含量和全氮主导,与王永平等^[16]在滇南小流域的研究结果一致。土壤 N/P 和 C/P 在不同用地类型中均表现为灌木>草地>林地>沟道>苹果园,即苹果园中土壤全磷的有效性更高,苹果园在巨大的磷流失量的前提下依然维持较高磷含量的主要原因可能在于苹果园相对于其它用地有外源磷肥的添加;灌木地由于天然的植被高盖度等因素导致土壤流失量较小,因此得以减少氮、磷流失量同时每年大量枯落物提供了源源不断的有机质输入,使其拥有高的 C/P 的重要保障。

4 结论

(1) 不同土地利用方式显著影响了小流域土壤侵蚀状况。土壤侵蚀模数介于 -18.67—151.27 t km⁻² a⁻¹ 之间,大小顺序为沟道>苹果园>林地>草地>灌木,均为微度侵蚀,其中,除灌木地发生沉积以外均发生了土壤侵蚀现象,且除沟道为轻度变异以外,其他土地利用均为中等变异。

(2) 土壤全氮含量、有机质含量、N/P 比和 C/P 比在不同土地利用方式下的变化特征表现一致,大小顺序均为灌木>草地>林地>沟道>苹果园。其中,土壤全氮含量整体处于中下水平,C/N 比超过全国平均水平而 N/P 比和 C/P 比远低于全国平均水平,表明小流域土壤氮限制严重。

(3) 小流域土壤养分流失与土壤养分状况及土壤侵蚀程度关系密切。土壤养分流失与土壤侵蚀模数表现一致,两者呈极显著正相关关系;与土壤全氮、全磷、有机质呈极显著负相关关系,表明土壤侵蚀仍是该小流域养分流失的重要诱因。

参考文献 (References):

- [1] 胡健, 胡金娇, 吕一河. 基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究. 生态学报, 2021, 41(16): 6417-6429.
- [2] Kumi S, Addo-Fordjour P, Fei-Baffoe B, Belford E J D, Ameyaw Y. Land use land cover dynamics and fragmentation-induced changes in woody plant community structure in a mining landscape, Ghana. *Trees, Forests and People*, 2021, 4: 100070.
- [3] Suzuki K, Liston G E, Kodama Y. Variations of winter surface net shortwave radiation caused by land-use change in northern Hokkaido, Japan. *Journal of Forest Research*, 2015, 20(2): 281-292.
- [4] Suchara I, Sucharová J, Holá M. Changes in selected physico-chemical properties of floodplain soils in three different land-use types after flooding. *Plant, Soil and Environment*, 2021, 67(2): 99-109.
- [5] Babur E, Süha Uslu Ö, Leonardo Battaglia M, Diatta A, Fahad S, Datta R, Zafar-ul-Hye M, Sabir Hussain G, Danish S. Studying soil erosion by evaluating changes in physico-chemical properties of soils under different land-use types. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2021, 20(3): 190-197.
- [6] 李桂芳, 杨任翔, 谢福倩, 梁志鑫, 安娟. 不同土地利用方式下红壤坡面土壤侵蚀特征. 水土保持学报, 2020, 34(2): 101-107, 230.

- [7] 姚文艺, 刘国彬. 新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策. 水土保持通报, 2020, 40(5): 333-340.
- [8] 黑哲, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 戈文艳. 退耕还林(草)以来陕北白于山区植被覆盖与土壤侵蚀强度变化. 水土保持研究, 2020, 27(4): 39-46.
- [9] 卓静, 朱延年, 何慧娟, 王娟, 董金芳, 权文婷. 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8627-8637.
- [10] 李婧, 马莉. 盐池县土地利用变化与生态环境的耦合关系. 中国水土保持科学, 2020, 18(2): 19-25.
- [11] 胡晓倩, 李忠武, 陈佳, 聂小东. 南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估. 水土保持学报, 2020, 34(6): 95-100.
- [12] 牛晓音, 王延华, 杨浩, 郑家文, 吴姗姗, 谢标. 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. 环境科学研究, 2014, 27(9): 1043-1050.
- [13] Xiong J F, Lin C, Wu Z P, Song K, Ma R H. Response of phosphorus in estuaries to soil erosion-A new insight into sediment phosphorus fractions and sources. CATENA, 2021, 207: 105665.
- [14] Ni S M, Zhang D Q, Cai C F, Wilson G V, Zhang J H, Wang J G. Exploring rainfall kinetic energy induced erosion behavior and sediment sorting for a coarse-textured granite derived soil of South China. Soil and Tillage Research, 2021, 208: 104915.
- [15] 杨媛媛, 李占斌, 高海东, 刘蓓蕾, 朱大为. 大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析. 水土保持学报, 2021, 35(1): 85-89.
- [16] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 牛晓音, 李晓辉. 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. 水土保持研究, 2021, 28(1): 11-18.
- [17] 张信宝, D.L.赫吉特, D.E.沃林. ¹³⁷Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究. 地球化学, 1991, 20(3): 212-218.
- [18] Li Y F, Wang Z G, Zhao J L, Lin Y M, Tang G P, Tao Z, Gao Q Z, Chen A M. Characterizing soil losses in China using data of ¹³⁷Cs inventories and erosion plots. CATENA, 2021, 203: 105296.
- [19] Wen Y R, Kasielke T, Li H, Zepp H, Zhang B. A case-study on history and rates of gully erosion in Northeast China. Land Degradation & Development, 2021, 32(15): 4254-4266.
- [20] 张勋昌. 应用¹³⁷Cs 示踪技术估算土壤侵蚀的若干问题探讨. 水土保持通报, 2017, 37(5): 342-346.
- [21] 刘志强, 杨明义, 刘普灵, 田均良. ¹³⁷Cs 示踪技术背景值研究进展与建议. 核农学报, 2008, 22(6): 913-917, 922.
- [22] 张燕, 彭补拙, 陈捷. ¹³⁷Cs 示踪法估算滇池流域土壤侵蚀. 核农学报, 2005, 19(2): 125-128.
- [23] 史佳良, 王秀茹, 李淑芳, 李宁. 次降雨过程中北京市不同土地利用方式下土壤养分流失特征. 水土保持学报, 2016, 30(5): 58-63, 68.
- [24] 张晓, 黄晓强, 信忠保, 孔庆仙, 夏晓平, 蒋秋玲. 北京山区不同林分林下植被根系分布特征及其影响因素. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 51-57.
- [25] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [26] 王承书, 高峰, 孙文义, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 宋小燕. 黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征. 生态学报, 2021, 41(8): 3111-3122.
- [27] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术: 中国土壤普查技术, 1992.
- [28] 薛智德, 朱清科, 梁宗锁, 康永祥, 常磊. 延安研究区退耕地植物群落动态变化特征. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 16-20.
- [29] 寇萌, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区抵抗土壤侵蚀的植物群落结构特征. 水土保持研究, 2018, 25(6): 7-14, 21.
- [30] 姜芸, 王军, 张莉. 东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征. 农业工程学报, 2020, 36(7): 157-165.
- [31] 肖华翠, 李靖雯, 夏允, 杨柳明, 林燕语, 范跃新. 中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(1): 16-22.
- [32] 刘艳武, 郭向红, 杨凯, 续海红, 孙西欢, 马娟娟, 雷涛, 贺琦琦. 滴灌条件下不同磷钾肥配比对苹果品质的影响及综合评价. 节水灌溉, 2020(6): 33-37.
- [33] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 杜海伦, 张雄清, 郭文福, 孙建军. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(4): 1207-1218.
- [34] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征. 环境科学, 2016, 37(3): 1128-1138.
- [35] Chen Y X, Wei T X, Sha G L, Zhu Q K, Liu Z, Ren K, Yang C. Soil enzyme activities of typical plant communities after vegetation restoration on the Loess Plateau, China. Applied Soil Ecology, 2022, 170: 104292.