

喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系

周梦玲¹, 郭建斌¹, 崔明², 李桂静¹, 王磊², 陆雅佩¹, 武建宏³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.中国林业科学研究院荒漠化研究所,
北京 100091; 3.河南省淅川县林业局,河南 淅川 474450)

摘要: 在丹江口库区喀斯特地区,研究分析自然降雨条件下 5 种不同植被覆盖类型(疏林地(C1)、乔木林地(C2)、坡耕地(C3)、荒草地(C4)、灌草地(C5))坡面侵蚀泥沙的氮、磷、钾养分流失及泥沙粒径分布特征,探讨泥沙养分流失与粒径分布的关系。结果表明:(1)侵蚀泥沙以粉粒(2~50 μm)、砂粒(50~2 000 μm)为主,0~20 μm 颗粒含量随降雨强度的增加而减少。0~2 μm 颗粒富集度集中在 3.08~6.62,2~20 μm 颗粒富集度集中在 2.48~3.58,20~2 000 μm 颗粒富集度集中在 1 左右。C4 的 0~2 μm 颗粒含量及其富集度明显高于其他植被覆盖类型。(2)速效钾的流失量远高于速效氮、磷流失量。氮素富集度集中在 1 左右,TP 富集度集中在 1.41~1.96,AP 富集度集中在 5.00~8.77,AK 富集度集中在 1.79~3.05,泥沙对磷、钾养分有明显富集作用,而对氮素富集作用很小。不同植被覆盖类型中,C4 的 TP、AK 含量显著高于 C1、C2、C3、C5($P<0.05$),C4 有增加 TP、AK 养分含量的作用,且 C2、C4 的氮、磷富集度相对较大。C3 的养分流失总量最大,C1、C2、C4、C5 有明显减小养分流失的作用,其中 C2 控制养分流失的效果最明显。(3)侵蚀泥沙的 TN、TP、AP、AK 含量与 0~2、2~20、20~50 μm 含量呈正相关关系,且与 0~2 μm 的相关性显著($P<0.05$),侵蚀泥沙的养分含量会随着 0~50 μm 颗粒含量的增加而增多。

关键词: 不同植被覆盖类型; 泥沙; 粒径分布; 养分流失

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0054-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.008

Relationship Between Nutrient Loss and Particle Size Distribution in Eroded Sediment of Karst Slope

ZHOU Mengling¹, GUO Jianbin¹, CUI Ming², LI Guijing¹, WANG Lei², LU Yapei¹, WU Jianhong³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Institute of Desertification Study, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;3.Xichuan Forestry Bureau of Henan Province, Xichuan, Henan 474450)

Abstract: In the karst area of the Danjiangkou reservoir area, the nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) nutrient loss and the sediment particle size distribution characteristics of slope erosion in five vegetation cover types (arbor forest land (C1), sparse forest land (C2), farmland (C3), grassland (C4), shrub grassland (C5)) under natural rainfall conditions were observed to discuss the relationship between sediment nutrient loss and particle size distribution. The results showed that: (1) The sediment of erosion was dominated by silt (2~50 μm) and sand (50~2 000 μm). There were significant differences in the sorting of clay (0~20 μm) particles between different vegetation cover types ($P<0.05$). The contents of fine particles (0~20 μm) in the eroded sediment decreased with the increase of rainfall intensities. The 0~2 μm particle concentrations were concentrated in 3.08~6.62. The 2~20 μm particle concentrations were concentrated in 2.48~3.58. The 20~50 μm particle concentrations were concentrated in 1.04~1.62. The 50~100 μm particle concentrations were concentrated in 0.61~0.88. The 100~2 000 μm particle concentrations were concentrated in 0.43~1.15. The 0~20 μm particle enrichment of C4 was the largest, and the 0~20 μm particle enrichment of C3 was relatively small. (2) Among the available nutrients, the loss of available K (AK) was much higher than those of available N (AN) and P (AP). The concentrations of total P (TP) and AK of C4 were significantly higher than those of C1, C2, C3 and C5 ($P<0.05$). The total nutrients loss in C3 was the largest, and C1, C2, C4 and C5 had the significant effect on reducing nutrient loss. The effect of C2 on controlling nutrient loss was the most obvious. The total N (TN) concentrations were concentrated at 0.56~1.25, the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

收稿日期:2019-05-05

资助项目:国家重点研发计划项目“断陷盆地石漠化区植被恢复与功能提升”(2016YFC0502504);“南水北调水源地丹江口库区石漠化治理效益监测”(2017-07)

第一作者:周梦玲(1994—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与水文水资源研究。E-mail:1625308320@qq.com

通信作者:郭建斌(1962—),男,博士生导师,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:jianbinguo@bjfu.edu.cn

at 1.08~1.17, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ at 0.94~1.50, and the TP at 1.41~1.96, the AP at 5.00~8.77, the AK at 1.79~3.05. The N and P enrichment were relatively low in C3, and relatively large in C2 and C4. (3) The contents of TN, TP, AP and AK in erosion sediment were positively correlated with the contents of 0~2, 2~20 and 20~50 μm , and the correlation with 0~2 μm was significant ($P < 0.05$). The nutrient concentrations increased as the fine particle content increased.

Keywords: different vegetation cover types; sediment; particle size distribution; nutrient loss

丹江口库区是南水北调中线工程的重要水源地,水库水质的好坏直接关心中线工程的成败^[1]。淅川县是南水北调中线工程核心水源地、渠首所在地及重要生态屏障,其石漠化面积高达 348.82 km^2 ^[2],年均土壤侵蚀模数高达 4 100 t/km^2 ^[3],石漠化问题十分突出,水土养分流失严重,直接影响库区水资源安全。对库区喀斯特地区的养分流失的研究十分有必要。

随着土壤养分流失,一方面改变表层土壤养分及机械组成^[4],降低原坡面土壤质量;另一方面泥沙携带的养分具有导致水体富营养化的潜力^[5],泥沙养分在水域中累积过多容易恶化水体环境。土壤养分随着径流及泥沙的迁移流失,氮流失以径流为主,磷、钾流失以泥沙携带为主,更有学者^[6]认为,可以将泥沙中的磷素视为坡面磷素总损失量,且坡面流失的泥沙有明显的氮、磷、钾富集效应^[4-6]。侵蚀泥沙颗粒通常由团粒(未经过化学分散的颗粒)和单粒(经过化学分散的颗粒)组成,且多以团粒形式出现^[7]。侵蚀泥沙的团粒有明显的富集现象,而单粒无明显富集现象^[8-9]。普遍认为团粒粒径分布更适合作为侵蚀泥沙的表征指标^[10]。目前,对不同土壤类型、不同覆盖度下土壤养分流失特征及侵蚀泥沙的粒径分布的研究较多,对侵蚀泥沙的颗粒组成与养分含量的关系研究较少。土壤粒径分布作为土壤侵蚀预报模型与养分输移模型的重要参数之一,对泥沙的粒径分布与养分之间的关系的研究是十分有必要的。目前,对于养分流失及泥沙粒径分布特征的研究主要集中在南方紫色土壤^[11-12]、红壤^[13-14]及北方褐土^[15]地区,对于喀斯特地区石灰性土壤养分流失的研究较少。研究试验多采用室内或野外人工模拟降雨试验^[14-16]。自然降雨条件下的侵蚀泥沙养分流失及粒径分布方面的研究相对较少。整体而言,喀斯特地区养分流失、泥沙粒径分布的研究相对较弱,处于初步探索阶段。

本试验选择在丹江口库区喀斯特地区河南省南阳市淅川县,以乔木林地、灌草地、荒草地、疏林地、坡耕地 5 种常见的植被覆盖类型为研究对象,通过标准径流小区观测试验,收集自然降雨条件下坡面泥沙并在实验室内测定泥沙养分及粒径,分析不同植被覆盖类型坡面下泥沙氮、磷、钾养分损失及泥沙粒径分布特征,探讨养分流失与粒径分布的关系,为丹江口水库面源污染控制和水质安全保障提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究样地位于淅川县(110°58′—111°53′E, 32°55′—33°23′N),河南省西南边陲,豫、鄂、陕三省七县(市)结合部,是南水北调中线工程核心水源地区和渠首所在地。属北亚热带大陆性季风气候,气候温和、雨量充沛。年均气温 14 $^{\circ}\text{C}$,最高气温 42 $^{\circ}\text{C}$,最低气温 -14.2 $^{\circ}\text{C}$,多年平均日照时间为 1 396 h,无霜期 236 d, ≥ 10 $^{\circ}\text{C}$ 的积温为 4 500 $^{\circ}\text{C}$,太阳总辐射量 110.8 J/cm^2 ,年平均降水量 804.3 mm。研究区内石漠化土地主要分布于山体的中上部,海拔为 200~500 m,坡度 $> 16^{\circ}$,基岩多为石灰岩,土壤多为石灰土,地表砾石(粒径 > 2 mm)体积含量可达 10%~40%,土壤有机质含量为 2.67%~16.20%,土壤 pH 7.38~8.53,可溶性组分高,易于溶蚀,在集中降雨季节,易出现水土流失,受长年雨水冲刷,土体受到侵蚀而变薄基岩裸露砾石堆积,最终演变成石漠化,形成了脆弱的生态环境。乔木树种主要有侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、油桐(*Vernicia fordii* (Hemsl.) Airy Shaw)等;灌木主要有白刺花(*Sophora davidii* (Franch.) Skeels)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow)等;草本植物主要有龙须草(*Juncus effusus*)、白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)、小蓬草(*Conyza canadensis* (L.) Cronq.)和荩草(*Arthraxon hispidus* (Thunb.) Makino)等。

1.2 试验设计

研究区内设置坡度为 27°、坡向为正东方向的 5 个长 20 m、宽 5 m、集水面积为 100 m^2 的标准径流小区。各径流小区上部及两侧设置水泥围埂,下部设置带盖的 1.0 m \times 1.0 m \times 1.2 m 的集流池,土壤、地貌大体一致,分别布设疏林地(C1)、乔木林地(C2)、坡耕地(C3)、荒草地(C4)、灌草地(C5) 5 种南水北调水源地具有代表性的植被覆盖类型,其中疏林地、荒草地属于原生植被,乔木林以鱼鳞坑方式 3 000 株/ hm^2 的造林密度栽植 5 年生马尾松,灌草地以 10 000 株/ hm^2 的造林密度栽植白刺花,坡耕地种植玉米(为减少施肥导致坡面养分差异较大的干扰,未对坡耕地进行施肥处理)。

1.3 降雨和产流产沙观测

2018 年 6—10 月,采用 3554 WD 翻斗式自记雨量

计监测次降雨的降雨过程。同时,监测每场降雨后各小区的产流产沙情况,采用体积法计算各植被覆盖类型小区每场降雨的产流量(R)。充分搅匀泥水使用 1 000 mL 径流瓶进行取样,分析各小区每场降雨的产沙量(E)。

选取径流小区 2018 年 6—10 月的 8 场降雨的监测数据。每场降雨的降雨特征及产沙情况见表 1。

1.4 样品采集与测量方法

在每场降雨前及降雨后采用五点取样法分别采集各小区表层(0—20 cm)土壤样品,均匀混合后用于土壤的颗粒组成及养分含量测定。收集次降雨后过滤、烘干、称重后的泥沙样品,用于泥沙的颗粒组成及养分含量的测定。土壤与泥沙的养分含量指标包括:全氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、全磷(TP)、速效磷(AP)、速效钾(AK)。TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的测定用碱解扩散法,TP、AP的测定用浸提钼锑抗比色法,AK的测定用乙酸铵提取火焰光度法,

土壤养分状况见表 2。土壤和泥沙的颗粒组成通过 Eyetech 粒度粒型分析仪(0.1~2 000 μm)测定,采用 ACM-104A 液体流量控制系统,分析水解后的颗粒粒径分布,每个样品重复测定 3 次,按照美国制粒径分级标准将粒径划分为:黏粒($< 2 \mu\text{m}$),细粉粒(2~20 μm),粗粉粒(20~50 μm),极细砂粒(50~100 μm),粗砂粒(100~2 000 μm)5 个区间,土壤颗粒组成状况见表 3。

表 1 8 场降雨的降雨及产沙特征

| 时间 (年-月-日) | $P/$ mm | $I/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) | 产沙量/g | | | | |
|---------------|------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| 2018-07-09 | 7.70 | 12.42 | 23.00 | 8.90 | 29.86 | 7.48 | 9.12 |
| 2018-07-28 | 10.90 | 3.48 | 12.78 | 3.03 | 7.97 | 2.90 | 28.75 |
| 2018-07-29 | 29.40 | 2.04 | 162.87 | 92.07 | 533.47 | 351.82 | 368.92 |
| 2018-08-02 | 30.10 | 9.24 | 420.00 | 340.09 | 768.03 | 217.46 | 279.21 |
| 2018-08-09 | 28.10 | 40.14 | 251.19 | 63.05 | 371.81 | 108.73 | 155.84 |
| 2018-08-15 | 13.20 | 6.34 | 14.12 | 7.39 | 17.76 | 2.80 | 9.77 |
| 2018-08-16 | 12.80 | 33.42 | 77.82 | 33.78 | 167.89 | 19.71 | 59.56 |
| 2018-09-19 | 15.80 | 1.08 | 24.75 | 11.43 | 166.90 | 2.38 | 34.22 |

表 2 不同植被覆盖类型降雨前坡面土壤养分状况

| 植被类型 | TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AP/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AK/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|------|--|---|---|--|---|---|
| C1 | 1.66±0.15ab | 223.78±9.97c | 5.78±0.05a | 0.62±0.02c | 3.64±0.15a | 214.48±2.66e |
| C2 | 1.41±0.17b | 249.91±5.07a | 5.42±0.12b | 0.65±0.02b | 3.26±0.10b | 227.13±5.87d |
| C3 | 2.15±0.65a | 237.58±3.27b | 4.97±0.35c | 0.72±0.01a | 4.18±0.11c | 249.63±5.25c |
| C4 | 1.77±0.67ab | 250.95±3.10a | 5.75±0.03a | 0.66±0.01b | 3.56±0.11a | 291.07±5.84a |
| C5 | 1.30±0.54b | 247.51±4.95a | 5.72±0.09a | 0.62±0.01c | 3.19±0.12b | 275.73±3.53b |

注:表中数据为 8 场降雨条件下的数据平均值±标准差;不同字母表示植被类型间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 3 不同植被覆盖类型降雨前坡面土壤颗粒组成

单位: %

| 植被类型 | 0~2 μm | 2~20 μm | 20~50 μm | 50~100 μm | 100~2 000 μm |
|------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| C1 | 0.24±0.05c | 6.26±0.75c | 18.40±1.95b | 35.58±3.67ab | 41.58±2.20a |
| C2 | 0.29±0.01b | 7.75±0.52b | 19.14±1.27b | 33.61±2.84ab | 39.69±1.93ab |
| C3 | 0.31±0.01ab | 8.86±0.72a | 24.44±1.39a | 31.56±2.42b | 34.84±1.29ab |
| C4 | 0.23±0.06c | 7.10±1.59bc | 24.26±6.45a | 37.34±6.76a | 30.65±8.83c |
| C5 | 0.35±0.03a | 7.55±0.30b | 21.90±0.43ab | 29.75±3.78b | 40.61±3.66a |

1.5 数据处理与分析

本研究通过侵蚀泥沙中各养分和颗粒富集度(ER)表示侵蚀过程中各养分及粒径颗粒被迁移的难易程度^[17-18]及富集作用的大小。 $ER = \text{侵蚀泥沙的养分或颗粒含量} / \text{降雨前坡面土壤的养分或颗粒含量}$ 。 $ER > 1$,说明养分或颗粒有富集能力; $ER < 1$,说明无富集作用。 ER 越大,说明该组分越容易被侵蚀即富集能力越强。养分流失总量由养分含量与产沙量的乘积可得。

运用 Excel 2013 和 SPSS 21 软件进行数据分析处理,应用 Pearson 相关系数在 0.01 和 0.05 的显著水平上进行显著性检验单因素方差进行分析,显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 侵蚀泥沙粒径分布特征

2.1.1 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙颗粒组成分析

对比分析侵蚀泥沙的颗粒组成(表 4),可知 0~2

μm 的颗粒含量在 1% 左右,其他粒径含量较均匀,50~2 000,2~50 μm 的颗粒含量在 50% 左右。侵蚀泥沙以粉粒(2~50 μm)、砂粒(50~2 000 μm)为主,砂粒中以极细砂(50~100 μm)为主。

不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的粒径有明显差异,C1、C3、C5 的 0~2 μm 颗粒含量显著低于 C2、C4 ($P < 0.05$),C1、C3、C5 的 50~100 μm 粒径含量显著高于 C4 ($P < 0.05$),不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的 2~20,20~50,100~2 000 μm 均无显著差异($P > 0.05$),说明不同植被类型对 0~2 μm 颗粒的分选性有显著差异($P < 0.05$),其中 C3 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒含量最小,C4 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒含量最大。与钱婧等^[19]研究结果一致,侵蚀泥沙中 0~2 μm 泥沙颗粒会随着植被覆盖条件下呈规律性变化,而其他粒径无显著差异。有研究^[20]表明,0~2 μm 颗粒含量会随着植被覆盖度的增大而增加,比较

C1、C2 2 种不同覆盖度的乔木林(C1 的植被覆盖度为 20%,C2 的植被覆盖度高达 50%)侵蚀泥沙颗粒组成,C1 与 C2 的 0~2 μm 颗粒含量有显著差异($P < 0.05$),C2 的 0~2 μm 颗粒含量是 C1 的 1.34 倍,说明喀斯特地区植被覆盖度越高,侵蚀泥沙中 0~2 μm

粒径含量越高。主要是由于随着植被覆盖度的增加,植被截留作用减弱雨滴对地表的击溅作用以及径流的迁移作用,坡面土壤大团聚体不易被分散、剥离,增加土壤的渗透作用,减小径流量及径流流速,径流优先搬运细颗粒^[21],使得侵蚀泥沙中细颗粒含量增加。

表 4 不同植被覆盖类型的侵蚀泥沙颗粒组成

单位:%

| 植被类型 | 0~2 μm | 2~20 μm | 20~50 μm | 50~100 μm | 100~2 000 μm |
|------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| C1 | 1.10±0.44b | 22.23±8.30a | 29.97±6.08a | 27.69±1.19a | 18.94±14.47a |
| C2 | 1.47±0.26a | 28.75±9.66a | 28.78±5.44a | 25.18±7.78ab | 15.59±9.55a |
| C3 | 0.91±0.35b | 22.12±6.20a | 30.22±2.84a | 27.95±3.85a | 18.70±8.44a |
| C4 | 1.51±0.27a | 25.31±7.66a | 24.80±6.22a | 21.79±3.12b | 26.67±14.41a |
| C5 | 1.06±0.29b | 21.62±7.10a | 24.80±4.48a | 26.75±3.29a | 25.44±13.87a |

2.1.2 雨强对侵蚀泥沙粒径分布的影响 选取降雨强度为 2.04,33.42 mm/h 有代表性的降雨,分析雨强对侵蚀泥沙粒径分布的影响见图 1。随着降雨强度增大,砂粒含量呈逐渐增大,粉粒和黏粒含量呈逐渐减少趋势,与彭怡等^[12]在紫色土区、郝艳芳等^[7]对红壤地区的研究结论一致。降雨强度为 2.04 mm/h 时,不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的 0~2 μm 颗粒含量为 1.02%~1.85%,2~20 μm 颗粒含量为 24.91%~46.44%,20~50 μm 颗粒含量为 26.79%~38.59%,50~100 μm 颗粒含量为 13.08%~32.15%,100~2 000 μm 颗粒含量为 0~19.00%;降雨强度为 33.42 mm/h 时,不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的 0~2 μm 颗粒含量为 0.49%~1.41%,2~20 μm 颗粒含量为 11.60%~19.12%,20~50 μm 颗粒含量为 19.48%~29.98%,50~100 μm 颗粒含量为 18.45%~29.72%,

100~2 000 μm 颗粒含量为 24.03%~46.27%;小降雨强度下侵蚀泥沙的 0~20 μm 颗粒含量明显大于大降雨强度下侵蚀泥沙的 0~20 μm 颗粒含量,50~2 000 μm 颗粒呈相反趋势,20~50 μm 颗粒的差异相对较小。前者侵蚀泥沙的 0~2 μm 颗粒含量是后者的 1.32~3.05 倍。侵蚀泥沙中 0~20 μm 颗粒含量随降雨强度的增加而减小,主要是由于不同降雨强度的降雨侵蚀力不同,降雨侵蚀力越大,粗颗粒更容易流失,导致泥沙中粗颗粒含量增大,细颗粒含量随之减小。吴凤至等^[21]对黄绵土泥沙粒径分布特征的研究中表明侵蚀泥沙 0~2 μm 颗粒含量随着降雨强度的增加而增加,主要因为黄绵土的黏粒含量较大,0~2 μm 黏粒在降雨湿润下,容易相互凝结大颗粒团粒,此“凝结降落”规律适用黄绵土地区,但对喀斯特石灰土地区不适用。

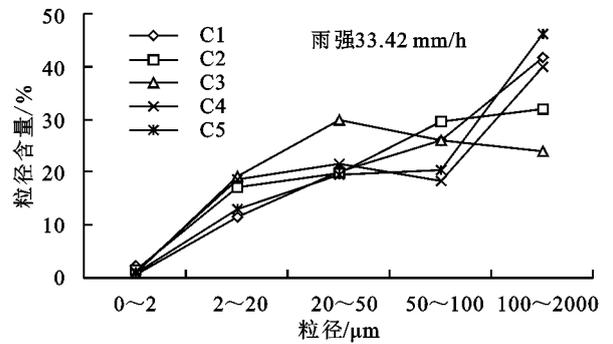
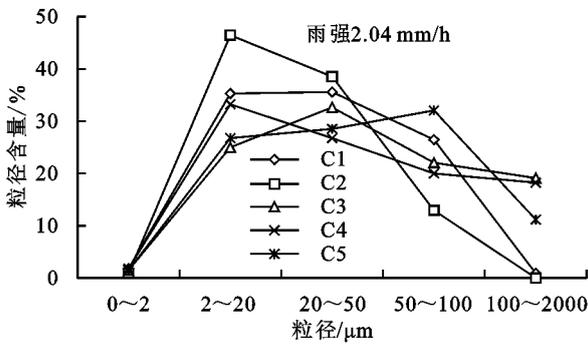


图 1 次降雨条件下侵蚀泥沙粒径分布

2.1.3 不同植被覆盖类型下不同粒径颗粒富集情况 对比分析降雨前各小区表层土壤的颗粒组成(表 3),可知 50~2 000 μm 含量均高于 70%,2~50 μm 的颗粒含量在 30%左右,0~2 μm 含量<1%,各小区土壤粒径以砂粒(50~2 000 μm)为主,粉粒(2~20 μm)含量次之,黏粒(0~2 μm)含量最少。将侵蚀泥沙的颗粒组成与雨前坡面表层土壤的颗粒组成(表 3、表 4)进行比较,泥沙 0~2,2~50 μm 颗粒含量均比降雨前坡面土壤含量高,50~2 000 μm 颗粒含量比降雨前坡面土壤含量低。说明粒径较小颗粒(0~

50 μm)有明显的富集作用。通过侵蚀泥沙中各粒径富集度(ER)表示侵蚀过程中各粒径颗粒被迁移的难易程度^[17-18]及富集作用的大小。 $ER = \text{侵蚀泥沙的颗粒含量} / \text{降雨前坡面土壤的颗粒含量}$ 。 $ER > 1$,说明颗粒有富集能力; $ER < 1$,说明无富集作用。 ER 越大,说明该组分越容易被侵蚀即富集能力越强。

比较分析不同粒径的富集度(图 2),可知 0~2 μm 颗粒富集度集中在 3.08~6.62,2~20 μm 颗粒富集度集中在 2.48~3.58,20~50 μm 颗粒富集度集中在 1.04~1.62,50~100 μm 颗粒富集度集中在 0.61~

0.88, 100~2 000 μm 颗粒富集度集中在 0.43~1.15, 说明泥沙对 0~20 μm 颗粒富集作用较强, 对 20~2 000 μm 颗粒富集作用较弱。与钱婧等^[19]、郭进等^[11]在三峡库区紫色土坡地的研究一致, 均表明泥沙中黏粒和细粉粒有明显的富集。径流对泥沙粒径的运移有分选性, 优先运移细颗粒, 而粗颗粒不易被侵蚀。

比较不同植被覆盖类型的 0~2, 2~20 μm 颗粒富集度有明显差异, 不同植被覆盖类型的 0~2 μm 颗粒富集度呈现 $C_4 > C_2 > C_1 > C_5 > C_3$, 其中 C_4 与其他植被类型有显著差异 ($P < 0.05$), C_3 显著低于 C_2, C_4 ($P < 0.05$), 2~20 μm 颗粒富集度呈现 $C_2 > C_1 > C_4 > C_5 > C_3$, C_3 与 C_4 的差异性显著, C_4 的 0~2 μm 颗粒富集度最大, 说明 C_4 的 0~2 μm 颗粒相对容易被侵蚀, 富集作用相对较强。

2.2 侵蚀泥沙养分流失特征

2.2.1 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的养分含量分析

对侵蚀泥沙中的各养分指标的含量进行统计分析(表 5), 可知同一植被类型径流小区的侵蚀泥沙 TN

表 5 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的养分含量

| 植被类型 | TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AP/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AK/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|------|--|---|---|--|---|---|
| C1 | 1.87±1.73a | 243.24±85.30a | 5.43±1.63a | 0.96±0.06b | 23.40±7.65a | 490.14±82.31b |
| C2 | 1.53±0.83a | 348.29±111.2a | 6.22±0.65a | 0.99±0.17b | 28.25±13.28a | 546.31±96.42b |
| C3 | 1.15±0.80a | 269.45±43.38a | 7.52±3.46a | 1.01±0.42b | 20.86±10.34a | 500.07±164.49b |
| C4 | 2.05±0.51a | 278.59±56.04a | 6.19±0.57a | 1.30±0.40a | 27.65±10.77a | 888.46±335.45a |
| C5 | 1.06±0.40a | 289.24±26.87a | 5.48±1.69a | 0.89±0.13b | 27.77±7.34a | 493.50±54.25b |

不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙中的 TP、AK 养分含量有显著差异 ($P < 0.05$), TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AP 养分含量无显著差异 ($P > 0.05$), 其中, C_4 的 TP、AK 含量显著高于 C_1, C_2, C_3, C_5 ($P < 0.05$), C_1, C_2, C_3, C_5 的 TP、AK 含量无显著差异, 说明草本覆盖对侵蚀泥沙养分含量的影响更大, 有增加泥沙养分含量的作用, 乔木林和灌草地相对于草地有明显减少 TP、AK 养分含量的作用, 林地和灌丛有较好的控制泥沙养分流失的作用^[23]。各营养元素在不同植被类型间差异不一致, 主要是由于该地区土壤中富含 TP 与 AK, 且对磷有较强的固定作用^[14], AK 易于吸附在细颗粒的土壤上^[24], 随着降雨径流流动向下迁移产生养分损失。

2.2.2 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的养分总量分析

从图 3 可以看出, 不同植被覆盖类型中 C_3 的养分流失总量最大, C_1, C_2, C_4, C_5 有明显减小养分流失的作用, 其中 C_2 控制养分流失的效果最明显。泥沙养分流失量主要由侵蚀量和泥沙养分含量决定^[4]。退耕还林还草可以减少喀斯特地区的土壤侵蚀程度^[25], 不同植被覆盖类型坡面的 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AP 养分浓度无显著差异 ($P < 0.05$), TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AP 养分流失量主要由侵蚀量决定。而 C_4

含量明显高于 TP 含量, 速效养分含量呈 $\text{AK} > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{AP} > \text{NO}_3^- - \text{N}$, 主要由于石灰岩风化形成的土壤中 AK 含量很高, 其次钾主要以无机态的形成附着在土壤颗粒表面^[6], 所以泥沙中钾的流失量远高于泥沙中氮磷含量。土壤胶体带负电荷对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附作用较大, 对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸附作用小^[22], 更容易溶解在径流中而发生损失, 导致土壤速效氮中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 明显缺乏。喀斯特地区的养分流失防治过程中需注重钾的流失。

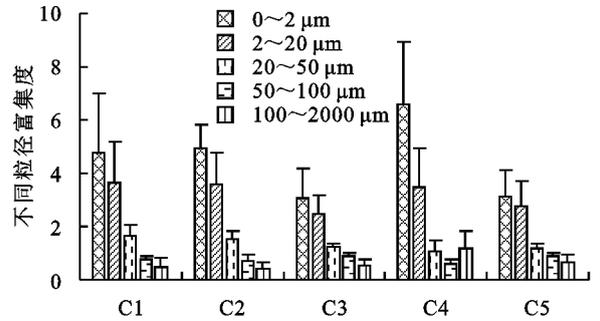


图 2 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙不同粒径的富集度

的 TP、AK 养分浓度显著高于其他植被类型 ($P < 0.05$), 说明 C_4 对泥沙中的 TP 和 AK 有显著的双重作用, 一方面能够固结土壤、拦蓄降雨径流从而减少土壤侵蚀作用; 另一方面会增加泥沙中的养分含量。张亚丽等^[26]研究表明, 草被对径流中的氮素流失也具有双重作用。 C_4 对养分流失的影响作用高于其他植被。

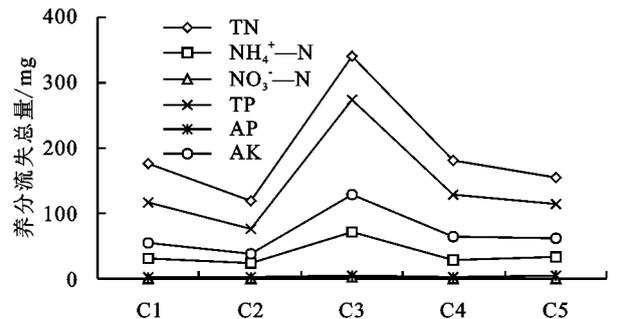


图 3 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的养分总量

2.2.3 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙养分富集度的特征分析

不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的养分含量比雨前坡面表层土壤有明显增加趋势, 说明侵蚀泥沙对氮、磷、钾养分具有富集作用。通过侵蚀泥沙中各养分富集度 (ER) 表示侵蚀过程中各养分被迁移的难易程度^[17-18]及富集作用的大小。 $ER = \text{侵蚀泥沙的各养分含量} / \text{降雨前坡面土壤的各养分含量}$ 。 $ER >$

1,说明该养分有富集能力; $ER < 1$,说明其无富集作用。 ER 越大,说明该组分越容易被侵蚀即富集能力越强。从图 4 可以看出,侵蚀泥沙的 TN 富集度集中在 0.56 ~ 1.25, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 集中在 1.08 ~ 1.17, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 富集度集中在 0.94 ~ 1.50, TP 富集度集中在 1.41 ~ 1.96, AP 富集度集中在 5.00 ~ 8.77, AK 富集度集中在 1.79 ~ 3.05。其中,AP 的富集度最大,AK、TP 次之,氮素的富集度最小且富集度在 1 左右,泥沙中氮素浓度与原始坡面土壤氮素含量基本一致。说明泥沙对磷、钾养分有明显富集作用,而对氮素富集作用很小,且对速效养分的富集度高于全量养分^[27]。土壤中的磷、钾极易被土壤固定,且极易附着于细颗粒的表面,导致磷、钾富集度较高^[14]。

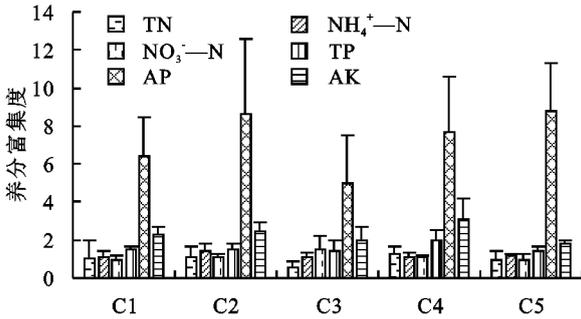


图 4 不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙养分富集度
不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙磷、钾养分富集作

用有明显差异,不同植被覆盖类型的 TP 富集度呈现 $C4 > C1 > C2 > C5 > C3$,其中 C4 与 C3、C5 有显著差异($P < 0.05$),AP 富集度呈现 $C5 > C2 > C4 > C1 > C3$,其中 C2、C5 与 C3 有显著差异($P < 0.05$),AK 富集度呈现 $C4 > C2 > C1 > C3 > C5$,其中 C4 与 C1、C3、C5 有显著差异($P < 0.05$)。综合表明 C3 的氮、磷富集度相对较小,C2、C4 的氮、磷富集度相对较大。

2.3 侵蚀泥沙的养分含量与颗粒组成的关系

为探究泥沙中的养分含量与土壤颗粒的关系,将不同植被覆盖下侵蚀泥沙的各养分含量与不同粒径的含量进行相关性分析(表 6)。不同植被覆盖类型侵蚀泥沙的 TN、TP、AP、AK 含量与 0~2, 2~20, 20~50 μm 含量呈正相关关系,与 100~2 000 μm 颗粒含量呈负相关关系,且与 0~2 μm 的相关性显著($P < 0.05$)。不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 0~2 μm 颗粒含量呈正相关,但多数相关性不显著($P > 0.05$)。不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的浓度与 0~2, 2~20, 20~50 μm 颗粒含量呈正相关,且与 0~2 μm 的相关性显著($P < 0.05$)。说明侵蚀泥沙的养分含量会随着细颗粒含量的增加而增多。侵蚀泥沙的细颗粒的比表面积较大^[28],所以泥沙养分富集会随着泥沙的细颗粒的富集而发生富集,更验证了细颗粒是养分流失的主要载体理论^[29]。

表 6 侵蚀泥沙粒径与养分含量的相关性

| 植被类型 | 颗粒粒径/ μm | TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NO}_3^- - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AP/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | AK/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|------|---------------------|--|--|--|--|---|---|
| C1 | 0~2 | 0.81* | 0.77* | 0.73* | 0.89** | 0.85** | 0.90** |
| | 2~20 | 0.92** | 0.84** | 0.66 | 0.95** | 0.82* | 0.81* |
| | 20~50 | 0.82* | 0.84** | 0.55 | 0.79* | 0.69 | 0.82* |
| | 50~100 | -0.23 | -0.13 | 0.31 | 0.01 | 0.37 | 0.06 |
| | 100~2000 | -0.88** | -0.85** | -0.69 | -0.92** | -0.86** | -0.86** |
| C2 | 0~2 | 0.87** | 0.13 | 0.63 | 0.83* | 0.85** | 0.77* |
| | 2~20 | 0.45 | -0.32 | -0.17 | 0.32 | 0.35 | 0.31 |
| | 20~50 | 0.27 | -0.43 | 0.09 | 0.26 | 0.19 | 0.31 |
| | 50~100 | -0.47 | 0.31 | 0.12 | -0.37 | -0.29 | -0.24 |
| C3 | 100~2000 | -0.27 | 0.32 | 0.01 | -0.21 | -0.27 | -0.33 |
| | 0~2 | 0.75* | 0.44 | 0.54 | 0.58* | 0.88** | 0.94** |
| | 2~20 | 0.50 | 0.52 | 0.27 | 0.40 | 0.70 | 0.78* |
| | 20~50 | 0.20 | 0.28 | -0.06 | 0.02 | 0.11 | 0.50 |
| C4 | 50~100 | -0.74* | -0.03 | -0.53 | -0.72* | -0.29 | -0.60 |
| | 100~2000 | -0.14 | -0.48 | 0.03 | -0.00 | -0.47 | -0.51 |
| | 0~2 | 0.78* | 0.73* | 0.46 | 0.82* | 0.85** | 0.93** |
| | 2~20 | 0.56 | 0.58 | 0.38 | 0.74* | 0.78* | 0.59 |
| C5 | 20~50 | 0.15 | 0.23 | 0.42 | 0.39 | 0.33 | 0.24 |
| | 50~100 | 0.29 | 0.01 | -0.55 | 0.09 | -0.03 | -0.13 |
| | 100~2000 | -0.44 | -0.42 | -0.27 | -0.60 | -0.57 | -0.40 |
| | 0~2 | 0.90** | 0.62 | 0.48 | 0.74* | 0.77* | 0.54 |
| C5 | 2~20 | 0.72* | 0.62 | 0.62 | 0.71 | 0.84** | 0.62 |
| | 20~50 | 0.62 | 0.59 | 0.22 | 0.52 | 0.76* | 0.49 |
| | 50~100 | 0.07 | -0.06 | 0.19 | 0.44 | 0.72* | 0.34 |
| | 100~2000 | -0.60 | -0.51 | -0.45 | -0.65 | -0.86** | -0.57 |

注: * 和 ** 分别表示相关程度为显著($P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$)。

3 结论

(1) 侵蚀泥沙以粉粒(2~50 μm)、砂粒(50~2 000 μm)为主,砂粒中以极细砂(50~100 μm)为主。0~20 μm 颗粒含量随降雨强度的增加而减少。0~2 μm 颗粒富集度集中在 3.08~6.62,2~20 μm 颗粒富集度集中在 2.48~3.58,20~2 000 μm 颗粒富集度集中在 1 左右。侵蚀泥沙对 0~20 μm 颗粒富集作用较强,对 20~2 000 μm 颗粒富集作用较弱。不同植被类型对 0~2 μm 颗粒的分选性有显著差异($P < 0.05$),其中 C3 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒含量最小,C4 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒含量最大。C4 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒的富集度显著高于其他植被类型($P < 0.05$),C3 侵蚀泥沙中 0~2 μm 颗粒的富集度显著低于 C2、C4($P < 0.05$)。

(2) 泥沙中养分流失量有明显差异。侵蚀泥沙中,AK 的流失量远高于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、AP 含量。侵蚀泥沙中氮素富集度集中在 1 左右,TP 富集度集中在 1.41~1.96,AP 富集度集中在 5.00~8.77,AK 富集度集中在 1.79~3.05。泥沙对磷、钾养分有明显富集作用,而对氮素富集作用很小。且对速效养分的富集度高于全量养分。不同植被覆盖类型中,C4 有增加 TP、AK 养分含量的作用,C1、C2、C5 相对于 C4 有明显减少其养分含量的作用;C2、C4 的氮、磷富集度相对较大;C3 的养分流失总量最大,C1、C2、C4、C5 有明显减小养分流失的作用,其中 C2 控制养分流失的效果最明显。

(3) 不同植被覆盖类型侵蚀泥沙的 TN、TP、AP、AK 含量与 0~2,2~20,20~50 μm 含量呈正相关关系,与 100~2 000 μm 颗粒含量呈负相关关系,且与 0~2 μm 的相关性显著($P < 0.05$)。不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 0~2 μm 颗粒含量呈正相关,但多数相关性不显著($P > 0.05$)。不同植被覆盖类型下侵蚀泥沙各养分含量与 0~2,2~20,20~50 μm 颗粒含量呈正相关,且与 0~2 μm 的相关性显著($P < 0.05$)。说明侵蚀泥沙的养分浓度会随着细颗粒含量的增加而增多。

参考文献:

[1] 汪兴中,蔡庆华,李凤清,等.南水北调中线水源区溪流生态系统健康评价[J].生态学杂志,2010,29(10):2086-2090.

[2] 勇毫,郭占胜,杨朝兴,等.丹江口库区石漠化现状及治理措施研究:以河南省淅川县为例[J].河北农业科学,2012,16(2):75-77.

[3] 顾汪明,周金星,武建宏,等.南水北调中线渠首淅川县石漠化治理现状与人工造林技术[J].林业资源管理,

2018(3):44-48.

- [4] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J].植物营养与肥料学报,2003(1):71-74.
- [5] 宋炜,刘普灵,郑良勇.核素示踪在土壤侵蚀研究中的应用[J].水土保持研究,2002,9(1):17-21.
- [6] 马悦,郭年冬,张瑞芳,等.片麻岩坡面花生不同生长期水土及养分流失规律[J].水土保持研究,2016,23(5):304-309.
- [7] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等.中国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J].水土保持学报,2018,32(2):150-159.
- [8] Wan Y, El-Swaify S A. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol[J].Geoderma, 1997, 75(3):251-265.
- [9] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J, et al. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J].Geomorphology, 2002, 45(3):261-275.
- [10] Hao Y F, Yang Y, Liu B Y, et al. Size characteristics of sediments eroded from three soils in China under natural rainfall[J].Journal of Soils and Sediments, 2016,16(8):2153-2165.
- [11] 郭进,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J].水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [12] 彭怡,王玉宽,傅斌,等.紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J].水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- [13] 刘俏,张丽萍,胡响明,等.红壤丘陵区经济林坡地氮磷流失特征[J].水土保持学报,2014,28(3):185-190.
- [14] 郭新送,宋付朋,高杨,等.模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J].水土保持学报,2014,28(3):23-28.
- [15] 李瀚之,余新晓,樊登星,等.不同覆盖措施对褐土养分流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):22-26.
- [16] 肖海,刘刚,许文年,等.土壤颗粒组成对 REE 吸附量及侵蚀示踪精度的影响[J].中国稀土学报,2013,31(5):627-635.
- [17] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio[J].Cate-na, 2012,90(3):47-52.
- [18] 叶芝茜,刘宝元,符素华,等.土壤侵蚀过程中的养分富集率研究综述[J].中国水土保持科学,2009,7(1):124-130.
- [19] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J].生态学报,2018,38(5):1590-1599.
- [20] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J].土壤学报,2012,49(6):1235-1240.
- [21] 吴凤至,史志华,方怒放,等.不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J].环境科学,2012,33(7):2497-2502.

- [17] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2007,14(4):9-11.
- [18] 王安,郝明德,王英文.人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J].水土保持通报,2012,32(2):26-28.
- [19] 刘巧玲,孙守文,冯大千,等.不同覆盖物对城市绿地土壤保水效果的试验研究[J].新疆农业科学,2006(5):436-438.
- [20] 顾小华,丁国栋,刘胜,等.一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J].水土保持研究,2006,13(1):106-107.
- [21] 赵方莹,逢红,祁有祥,等.城市河渠生态护坡技术效益对比:以北京市新开渠为例[J].中国水土保持科学,2006(增刊1):67-70.
- [22] 马文宝,姬慧娟,宿以明,等.植被毯边坡防护特点及其研究应用[J].中国水土保持,2013(1):30-33.
- [23] 周美超.清水河县公益林生态效益评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [24] 杨阳.呼和浩特市清水河县银贡山公园观叶树木引种适应性评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [25] 闵俊杰.不同植被格局下人工模拟降雨对坡面侵蚀的影响[D].南京:南京林业大学,2012.
- [26] 陈建纲.混播草地播种量的计算方法[J].农村养殖技术,2004(17):34.
- [27] 路炳军,袁爱萍,章文波.径流小区集流桶(池)泥沙含量快速测定方法探讨[J].水土保持通报,2009,29(2):15-17.
- [28] 田野.堆渣边坡两种护坡措施的水土保持效益研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [29] 李宏钧,孔亚平,张岩.植物纤维毯生态防护效益研究述评[J].中国水土保持科学,2016,14(3):146-154.
- [30] 葛金金,杨加智,詹美礼,等.坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J].源科学,2015,33(2):101-104.
- [31] 白玉洁.急陡黄土坡面土壤侵蚀过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [32] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [33] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001(5):449-457.
- [34] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.
- (上接第60页)
- [22] Yan H J, Bai G, He J Q, et al. Influence of droplet kinetic energy flux density from fixed spray-plate sprinklers on soil infiltration, runoff and sediment yield[J]. Biosystems Engineering,2011,110(2):213-221.
- [23] 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.
- [24] 张少良,张兴义,刘晓冰,等.典型黑土区不同坡位剖面土壤速效钾空间分布规律研究[J].土壤,2014,46(2):218-224.
- [25] 岳坤前,顾再柯,李瑞.喀斯特石漠化地区地下水流失研究进展与展望[J].中国水土保持,2015(5):58-61.
- [26] 张亚丽,李怀恩,张兴昌,等.牧草覆盖对坡面土壤矿质氮素流失的影响[J].应用生态学报,2006,17(12):2297-2301.
- [27] Young R A, Olness A E, Mutchler C K, et al. Chemical and physical enrichments of sediment from cropland[J].Transactions of the Asae,1986,29(1):165-169.
- [28] 张冠华,刘国彬,王国梁,等.黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较[J].水土保持通报,2009,29(1):1-6.
- [29] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等.三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J].水土保持研究,2005,12(1):159-161.