暴雨作用下排土场平台—边坡系统土体养分流失特征

赵蕴仪[1]，曹小平[2]，刘 媛[3]，吕 刚[1]

(1.辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；
2.无棣县城乡水务发展服务中心，山东 无棣 251900；3.内蒙古赤峰市克什克腾旗青山林场，内蒙古 赤峰 024000)

摘　要：[目的] 探讨中国矿区排土场平台边坡系统土体养分流失的特征及过程，为排土场土壤养分流失防治等问题提供理论依据。[方法] 以辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场为研究对象，通过相似模拟原理建立排土场平台—边坡系统室内模型，采用人工模拟降雨试验研究不同降雨强度(60，90，120 mm/h)条件下排土场平台—边坡系统土体养分流失的过程及特征。[结果] ①随着降雨强度的不断增大，排土场平台—边坡土壤氮、磷、钾养分浓度的变化状况均呈先降低，随后升高，又逐渐降低的趋势，总体趋势表现为：60 mm/h＞90 mm/h＞120 mm/h。②随着降雨强度的不断增大，排土场平台边坡土壤中各种径流养分流失量都增大，其中 TN，TP，TK 径流养分流失量均随雨强的增大而增大，而 NO_3^--N，NH_4^+-N，AP 和 AK 径流养分流失量却随雨强的增大变化不明显。③排土场平台边坡土壤泥沙养分流失浓度均大于地表径流中的养分浓度；泥沙养分流失量均随降雨强度的增大而增大。④随着降雨强度的增大，土壤泥沙中全氮、全钾的养分富集率也随之增大，表现为：TN＞TP＞TK。[结论] 排土场平台—边坡系统土体形态特征复杂，其土壤养分流失浓度主要受降雨强度和土壤本身两个因素的共同影响。

关键词：排土场平台—边坡系统；降雨强度；径流；泥沙；养分流失；富集率；水土流失

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0058-07　　**中图分类号：**S157.1

文献参数：赵蕴仪，曹小平，刘媛，等.暴雨作用下排土场平台—边坡系统土体养分流失特征[J].水土保持通报，2025，45(1)：58-64. Zhao Yunyi, Cao Xiaoping, Liu Yuan, et al. Nutrient loss characteristics in dump waste platform-slope systems under heavy rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 58-64. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.007; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.007.

Nutrient loss characteristics in dump waste platform-slope systems under heavy rainfall

Zhao Yunyi[1], Cao Xiaoping[2], Liu Yuan[3], Lü Gang[1]

(1.*College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning* 123000, *China*; 2.*Wudi County Urban and Rural Water Development Service Center, Wudi, Shandong* 251900, *China*; 3.*Qingshan Forest Farm, Keshiketeng Banner, Chifeng, Inner Mongolia* 024000, *China*)

Abstract: [Objective] The characteristics and processes of soil nutrient loss in the platform slope system of a discharge site in China's mining area were analyzed in order to provide a theoretical basis for preventing and controlling nutrient loss at discharge sites. [Methods] Using the discharge site of the Haizhou open-pit coal mine in Fuxin City, Liaoning Province, as the research object, an indoor model of the platform-slope system of the discharge site was established through the principle of a similar simulation, and an artificial rainfall simulation test was used to study the process and characteristics of nutrient loss from the platform-slope system of the discharge site under different rainfall intensities (60, 90, and 120 mm/h). [Results] ① With escalating rainfall intensity, the soil nutrient concentrations for nitrogen, phosphorus, and potassium in the dump waste platform-slope system exhibited a pattern of initial decline, subsequent rise, and then a gradual decrease, 60 mm/h > 90 mm/h > 120 mm/h for each intensity. ② The runoff nutrient loss from the platform slope soil increased with increasing rainfall intensity, notably for total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and

收稿日期：2024-06-26　　**修回日期：**2024-09-30　　**采用日期：**2024-09-30

资助项目：辽宁省“兴辽英才计划”项目“辽东水源涵养林区矿山废弃地生态修复关键技术研究”(XLYC2007046)

第一作者：赵蕴仪(1999—)，女(汉族)，辽宁省阜新市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀与流域治理。Email：zhaoyunyi2024@126.com。

通信作者：曹小平(1978—)，男(汉族)，吉林省榆树市人，本科，高级工程师，主要从事水利建设管理方面的研究。Email：sdscxp@qq.com。

total potassium (TK). However, the loss of nitrate (NO_3^--N), ammonium (NH_4^+-N), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) in runoff did not change significantly with increasing rainfall intensity. ③ The nutrient concentration in the soil sediment from the dump waste platform slope consistently exceeded that found in surface runoff, with sediment nutrient loss escalating as the rainfall intensity increased. ④ The enrichment ratio of total nitrogen and total potassium in soil sediment rose with greater rainfall intensity, expressed as TN > TP > TK. [Conclusion] The concentration of soil nutrients lost in the dump waste platform-slope system was predominantly influenced by rainfall intensity and soil characteristics.

Keywords: dump waste platform-slope systems; rainfall intensity; runoff; sediment; nutrient loss; enrichment ratio; soil and water loss

排土场是在露天开采过程中形成的平台和边坡相间的高陡疏松型堆积体,与原地貌相比,排土场具有平台岩土压实、土壤结构差、坡度大、坡长长、物质组成复杂、特殊的孔隙以及洞穴分布等特性[1]。这些特性使得排土场成为露天矿区水土流失最为严重的区域。矿山过度开采造成土壤养分流失,引起土壤的物理和化学性质变化[2],可能降低土壤稳定性,进而影响植物存活[3],最终影响土地生产力,引发水体富营养化,对矿区生态环境造成严重破坏。以往关于排土场平台—边坡系统的研究大多集中在边坡稳定性[4]、植被恢复[5]、土壤侵蚀[6]、坡面产流产沙[7]等方面。排土场土体养分流失过程具有一定的特殊性和复杂性,有相关研究[8]表明,在模拟不同降雨强度下,排土场侵蚀泥沙中的有机质、全氮、速效磷和速效钾含量以及流失速率都呈单峰规律。且随着降雨强度的增大,泥沙中的养分含量和土壤养分流失速率都呈增高趋势。土壤中流失的养分,特别是氮和磷,可能通过地表径流或侵蚀进入水体,导致富营养化和破坏水生态系统[9]。不同植被恢复模式下的排土场土壤养分含量随土层深度的增加整体呈下降趋势,表明表层土壤养分较为富集,具有明显的表聚性特征[10]。在人工降雨条件下,不同粒径泥沙中的氮磷流失特征存在显著差异[11]。研究不同雨强下的排土场平台—边坡系统产流产沙特征,阐明养分流失规律及影响因素,可有效减少排土场水土及养分流失,提高土地生产力。因此,本研究通过人工模拟降雨试验深入探讨我国矿区排土场平台边坡系统土体养分流失的特征及过程,为排土场养分流失防治等提供理论依据。

1　研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场西南部(121°40′12″E,41°57′36″N)(图 1),属中温带大陆性半干旱湿润季风气候,年平均气温 7.3 ℃,全年蒸发量 1 790 mm,春季干旱少雨,风沙较大。多年平均降水量 511.4 mm,且多集中于 7—8 月份,占全年降雨量的 80%,常以暴雨形式发生。2004 年,国土资源部投资进行了土地复垦工作,覆土厚度约为 0.3 m,复垦树种为榆树(*Ulmus pumila*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、刺槐和榆树混交、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、火炬树(*Rhus typhina*)等。

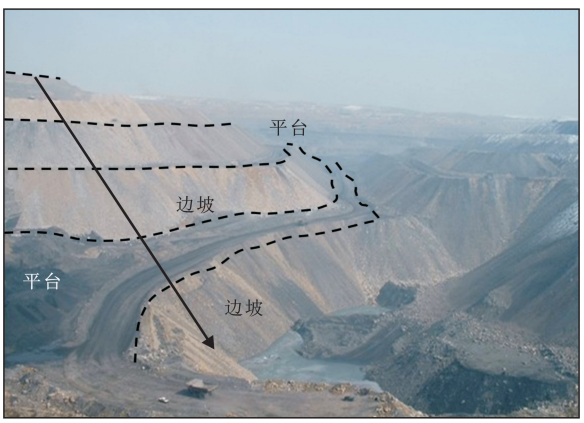

图 1　辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场实景
Fig.1　Real scene of Haizhou open-pit coal mine's dump waste area in Fuxin City, Liaoning Province

2　研究方法

2.1　试验装置

通过查阅文献和野外实地调查,设计室内模拟排土场高度为 50 cm,平台宽为 40 cm,台阶坡面角为 33°,试验采用有机玻璃材质的土槽,土槽内部玻璃板厚度为 10 mm,长度为 1.1 m,宽度为 0.5 m,高度为 0.6 m。土槽内部构建了一个直角梯形的垂直剖面,该结构设计用于放置土样。旨在模拟排土场的边坡。土样的上部平台宽度为 40 cm,下部平面宽度为 110 cm,整个剖面的角度设定为 35°。为便于收集降雨过程中产生的径流泥沙,在土槽中设置径流桶,以精确测量和分析径流泥沙的数据。

采用室内人工模拟降雨试验,选用便携式人工降雨器为降雨设备,并通过人工控制降雨强度,模拟自然降雨过程。整个试验系统由蓄水池、水源、潜水泵、压力表等四部分构成。降雨设备由 10 个圆形喷头构成,喷头行间距为 0.5 m,口径为 2.5 mm,距离地面垂直高度约为 4.0 m,测量其平均降雨半径为 1.8 m,

在土槽底部设置 16 个直径为 2 cm 的圆形排水孔，为避免多余水分对试验结果的干扰，使用纱布对排水孔进行了填塞处理。确保在试验期间，降雨均匀度维持在 80%以上(误差控制在 5%以内)，以确保试验数据的准确性和可靠性。

2.2 试验设计

试验设计 3 个降雨强度(60 mm/h，90 mm/h，120 mm/h)，降雨历时为 45 min，模型垂直剖面为等腰三角形。现场取土采用“分层采集法”，在每个特定土层采集 2 kg 土壤样品，混合装袋，将试验土样带回实验室后分别进行风干和过筛，将风干后的土样先过 2 mm 筛，去掉土壤的根系、枯落物等杂质。将配置好的土样分 5 层填入土槽中，每 10 cm 一个土层，每层进行打毛处理，模拟排土场覆土状态，控制土壤容重为 1.35 g/cm^3(相对误差不超过 5%)。

试验于 2021 年 7 月 10 日至 2021 年 10 月 30 日进行，试验前，先进行预降雨，使土壤水分达到充分饱和并产流后，计时收集水样。试验正式开始后，记录土槽产流时间，每 1 min 用径流桶取一次径流水样，用于测定径流水样中 TN，TP，TK 的含量，当出现径流沟后，用钢尺每 5 min 测一次沟深、沟长。将其余径流全部收集在其他径流桶内，用于测定径流及泥沙量。收集径流样品静止 4～5 h，取上清液测定各指标，采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定总氮(TN)含量；采用过硫酸钾氧化—钼锑抗比色法测定总磷(TP)含量；采用原子吸收光谱仪法测定全钾(TK)含量。测定泥沙养分指标时，分别采用酸溶—火焰光度法测定全钾含量；半微量凯氏法测定全氮含量；NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定全磷含量。在每次降雨完成后，取出试验土槽内土壤，在自然条件下风干，过 2 mm 筛，再进行分层重填，反复压实。

2.3 数据处理

采用 Excel 2022 与 SPSS 27.0 进行数据分析，采用 Origin 2022 进行图表制作。

3 结果与分析

3.1 不同雨强条件下径流养分流失过程分析

径流是养分流失的主要载体，当排土场发生水土流失时，常常会导致养分随着径流一起流失[12]。由图 2 可知，各形态氮养分浓度随着降雨强度的不断增大都呈先降低，随后升高，又逐渐降低的变化过程。由图 3 分析发现，随着降雨强度的提升，径流中磷的流失呈现先降低、随后升高、又逐渐降低的趋势，由图 4 可知，不同降雨强度下速效钾与全钾的流失浓度，进而分析雨强对钾元素流失特性的影响。结果表明，钾浓度随着降雨强度的增大，呈先降低，随后升高，又逐渐降低的趋势，总体趋势表现为：60 mm/h＞90 mm/h＞120 mm/h。在较低的降雨强度(60 mm/h)下，TN 浓度在 19 min 达到最高值 1.06 mg/L。而在降雨强度为(90 mm/h，120 mm/h)下，TN 浓度在 19 min 分别降低了 0.31，0.43 mg/L。硝酸盐氮(NO_3^--N)和铵态氮(NH_4^+-N)浓度的变化趋势相似，均呈现先降低后增高，随后降低，最终趋于稳定的趋势。当雨强为 90 mm/h，两者浓度分别达到最高值 0.78 和 0.59 mg/L。在不同雨强的影响下，NO_3^--N 浓度大于 NH_4^+-N，且在 60 mm/h 雨强下，两者浓度迅速上升。各形态氮养分浓度呈 TN＞NO_3^--N＞NH_4^+-N 的变化趋势。不同形态氮养分浓度在地表径流中的流失过程，均呈现出在降雨开始时浓度最高，而后随降雨持续降低，最后在小范围内发生了波动；其中，在 60 mm/h 时，TN 的起始浓度较高，为 0.92 mg/L，而 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的起始浓度为 0.68 和 0.66 mg/L。这是由于在降雨开始阶段，土壤表面的氮相对较富集，随降雨时间的增加，氮的含量会逐渐降低，当土壤与径流的交互作用达到一个相对平衡的状态后，氮的流失就会变得缓慢。

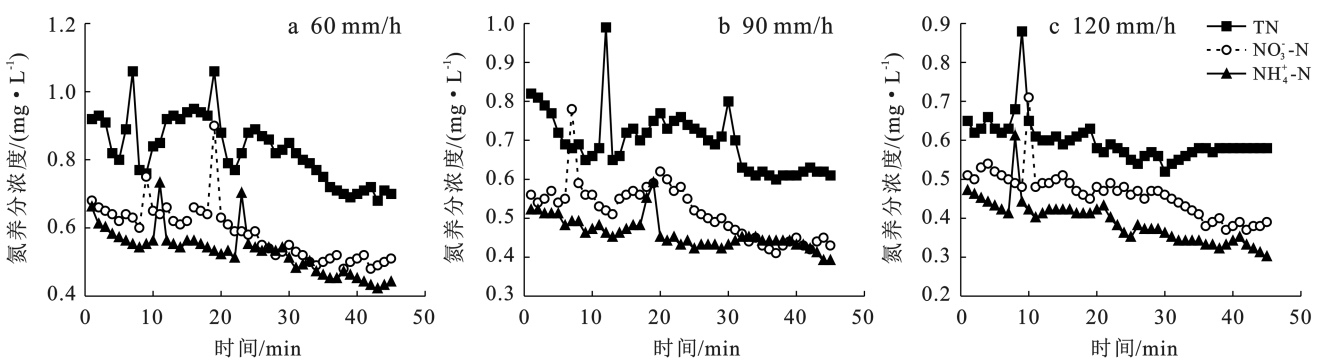

图 2 不同雨强条件下氮养分流失过程

Fig.2 Process of nitrogen nutrient loss under different rainfall intensities

由图 3 可以看出,在径流形成初期,地表径流的 AP 和 TP 输出浓度呈现缓慢下降的趋势,之后随着径流的持续,输出浓度逐渐增大,最终趋于一个稳定值,在 0.27～0.51 mg/L 之间。原因在于在径流的初始阶段,土壤的表层磷相对比较富集,而且初始径流的流量不大,表土的可溶磷含量比较高。随产流时间延长、产流速率提高,产流中养分浓度有所降低,但当产流 10 min 左右时,磷素浓度再次呈现上升趋势。当土壤和径流达到一个相对平衡的状态后,磷的流失就会逐渐减少。在不同降雨强度下,总体趋势表现为:60 mm/h＞90 mm/h＞120 mm/h,在 60 mm/h 降雨强度下 TP 的浓度在 11 min 时达到 0.72 mg/L 的峰值,AP 的瞬时浓度在 19 min 时达到峰值 0.68 mg/L,全磷的变化范围介于 0.20～0.72 mg/L。在 90 mm/h 的降雨强度下,雨滴对边坡的冲刷作用导致土壤中的磷完全溶解。因此,地表径流成为了磷流失的主要途径。在产流初期,雨水刚开始冲刷,土壤中养分浓度相对较高。然而,随着产流的持续进行,养分逐渐被雨水冲刷带走,浓度逐渐降低并最终趋于稳定状态。在雨强为 120 mm/h 的条件下,TP 和 AP 浓度均呈现最低,这表明流失的磷浓度受多重因素共同影响,具体而言,除了土壤本身的含磷量外,地表径流量的变化也对磷浓度的流失起到了重要作用。当产流量较大时,磷浓度往往会出现下降的趋势,主要是因为土壤中的磷易随降雨在径流中溶解。

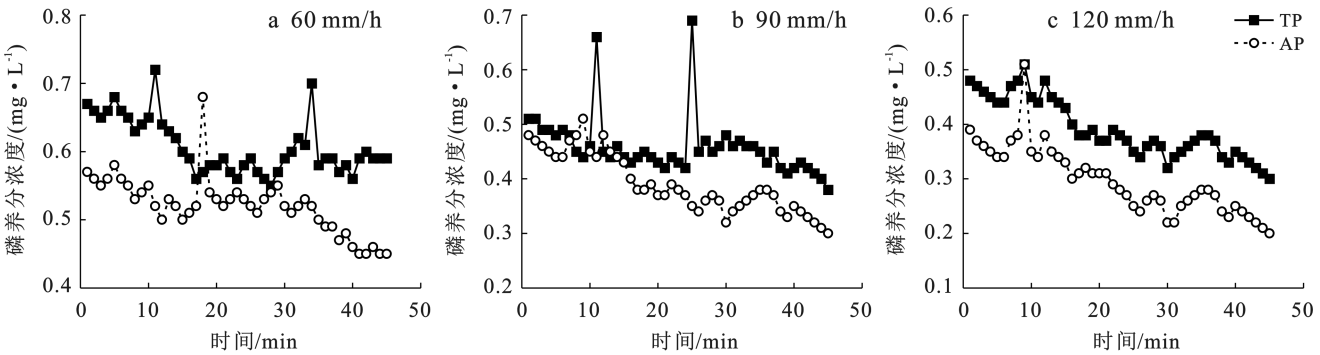

图 3　不同雨强条件下磷养分流失过程

Fig.3　Process of phosphorus nutrient loss under different rainfall intensities

由图 4 分析可知,在产流初期,主要养分浓度含量随着时间的推移而发生了变化,径流中的水分和养分含量较高。相比于氮、磷元素,雨水侵蚀过程中的钾元素流失量更显著。不同降雨强度下,全钾(TK)初始浓度为 9.05,7.5,6.64 mg/L;速效钾(AK)的初始浓度为 5.92,5.72,4.88 mg/L。当降雨强度为 60 mm/h 时,TK 在 20 min 时达到峰值为 10.07 mg/L,AK 在 16 min 时峰值达到 7.15 mg/L,随后一直呈减小趋势。当降雨强度为 90 mm/h 和 120 mm/h 时 TK 和 AK 的峰值分别减少了 0.77,1.6,1.02,1.57 mg/L。说明全钾和速效钾流失浓度随雨强增加而逐渐减小。从而得出土壤的养分浓度随径流流失主要是在降雨的起始阶段,于后期逐渐趋于稳定。由上述分析可知,钾的流失以地表径流的流失为主,是由于地表径流中的全钾含量远高于地下径流中的全钾含量。

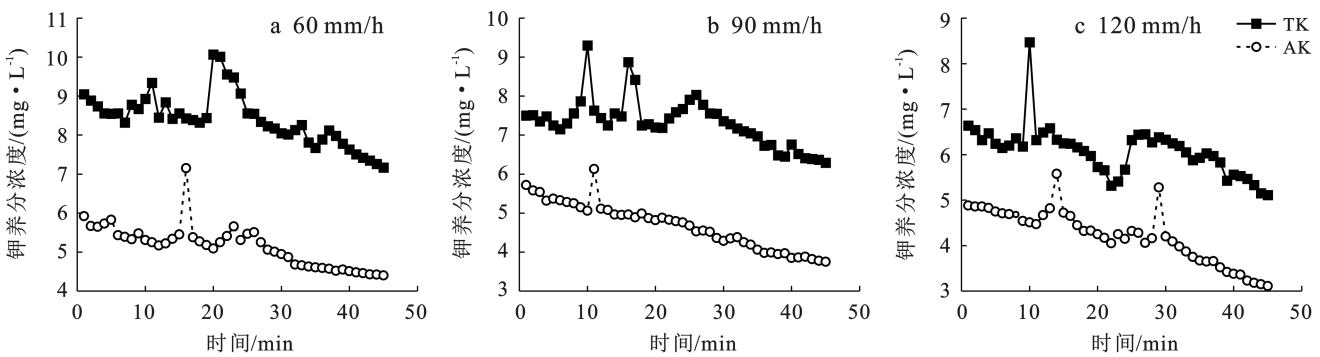

图 4　不同雨强条件下钾养分流失过程

Fig.4　Process of potassium nutrient loss under different rainfall intensities

3.2 不同雨强条件下径流养分流失量特征

土壤养分的输出，主要是通过泥沙的携带和径流的溶解[13]。通过对不同雨强下氮、磷、钾流失情况的统计分析，由图 5 可以看出，降雨强度对养分的总流失量有显著影响，各形态氮、磷、钾的流失量都随降雨强度的增加而增加。具体来说，TN 的流失量介于 141.16～778.8 mg/L，NO_3^--N 的流失量介于 45.19～84.53 mg/L，NH_4^+-N 的流失量介于 15～21.45 mg/L，TP 的流失量介于 127.3～568.94 mg/L，AP 的流失量介于 54.55～70.51 mg/L，而 TK 的流失量介于 243.98～922.59 mg/L，AK 的流失量介于 104.2～180.12 mg/L。地表流失的氮、磷、钾比例介于 11.15%～61.50%，表明大部分土壤养分随地表径流流失。总体趋势表现为：60 mm/h＜90 mm/h＜120 mm/h，各形态氮养分流失量呈 TN＞NO_3^--N＞NH_4^+-N 的变化趋势。较大雨强时，排土场径流中的氮素主要以颗粒态存在，而在小雨强下主要以溶解态存在[14]。各形态磷养分流失量呈 TP＞AP 的变化趋势，当降雨强度逐渐增大时，TP 和 AP 的流失量均随着降雨量的增加而呈现上升趋势。而雨强对 TP 流失量的影响更为显著，这一现象可能是由于不同形态磷在土壤中的赋存状态及迁移特性的差异，以及雨强对土壤侵蚀和径流冲刷作用的强化效应导致的。AK 占 TK 的比例逐渐减小，随着降雨强度的增大，钾的流失量也呈现出递增的趋势，这反映了降雨量对径流生成及随后养分流失的显著影响。从一方面来看，降雨是钾元素流失的主要动力；而另一方面，农田管理措施提升了土壤中钾的含量。钾具备较强的水溶性，这导致了钾元素随着径流的发生而流失。

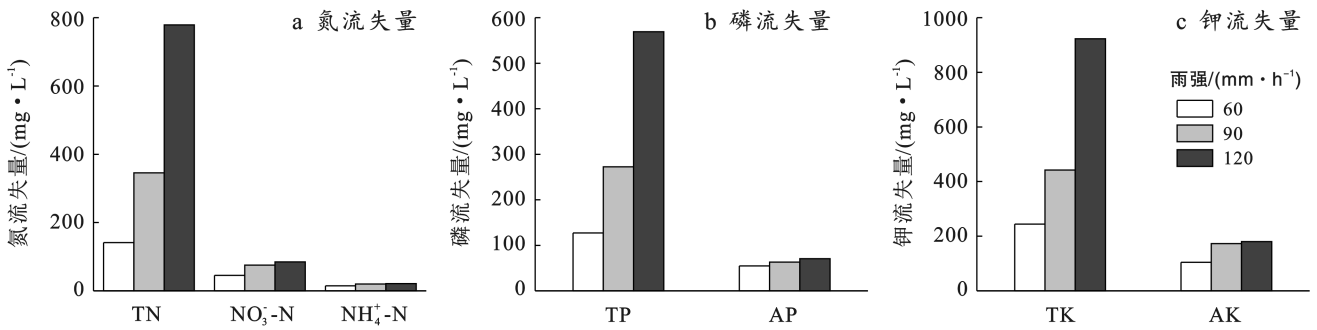

图 5 不同雨强条件下氮、磷、钾流失量变化

Fig.5 Changes in nitrogen, phosphorus and potassium losses under differing rainfall intensities

3.3 不同雨强条件下泥沙养分流失过程分析及流失量特征

由图 6 可知，各降雨强度下的 TN，TP，TK 养分流失浓度及流失量变化情况，泥沙养分流失浓度均随降雨强度的增大而减小，其流失量均随降雨强度的增大而增大。TN 的养分流失浓度在 0.51～1.01 mg/L，TP 的养分流失浓度在在 0.57～0.72 mg/L，TK 的养分流失浓度在 5.56～8.42 mg/L；TN 的养分流失量在 195.41～833.05 mg/L，TP 的养分流失量在 170.59～662.23 mg/L，TK 的养分流失量在 339.65～1 018.26 mg/L。分析对比可知，随着降雨强度的增强和产沙量的增加会显著加剧养分的流失。试验结果显示，当雨强分别为 60 和 90 mm/h 时，泥沙中的全氮、全磷和全钾养分浓度表现出明显的差异。表明在降雨强度较大时，雨滴的动能显著增强，导致产流产沙量增多，强降雨的冲刷作用使得大量养分被迅速带走。因此，随着降雨强度的增大，径流泥沙中的养分浓度减少。然而，降雨强度较小的条件下，泥沙中的养分含量相对较高。是由于降雨强度较低时不易引发土壤颗粒的击溅，从而减少了因崩塌等外力作用导致的土壤侵蚀。因此，在这种条件下，径流和泥沙的产生量相对较多，进而使得土壤泥沙中的养分含量增加，表明水土流失严重损害了土地的生产力，其主要表现在养分的流失上。这种流失不仅破坏了土壤的物理结构，还造成了土壤中养分的大量减少。

3.4 不同雨强下的泥沙养分富集特征

由于径流的筛选作用，降雨径流中的泥沙颗粒相对细于土壤颗粒，从而导致泥沙养分含量高于土壤中养分含量，呈现出明显的富集现象，富集程度的大小以泥沙中的养分含量与土壤养分含量的比值即富集率表示[15]。对前述 3 种富集率(ER)进行分析(表 1)，可知整体趋势为富集率(ER)随着降雨强度增加逐渐增加，全氮的富集率＞1，全磷、全钾的富集率＜1，分别为 0.67 ～0.84 g/kg 和 0.22 ～0.41 g/kg，表明在降雨初期，泥沙携带的养分并不完全受径流的影响，而是在坡面经历了一次再分配过程。随降雨持续进行，养分的富集率逐渐升高，整体看来表现为：全钾＜全磷＜全氮。径流所携带的泥沙养分进入河流容易造成水体污染和富营养化，全氮的富集率＞1，说明氮元素通过泥沙富集排入河流或湖口，造成面源污染[16]。

排土场平台边坡的土壤养分流失受泥沙和径流的共同影响,其中泥沙携带是主要的流失方式。排土场平台—边坡土体养分流失主要是通过径流的养分流失和侵蚀泥沙携带的养分流失,前者以溶解态存在,后者以颗粒态存在。在暴雨作用条件下,泥沙流失量很大,但径流中水溶态养分含量极低,其流失总量相对泥沙流失总量可以忽略不计。在降雨强度较小时,径流携带泥沙能力较弱,泥沙含量较小,通过对径流流失量与泥沙流失量所占比例进行分析。由表 1 可知,雨强在60 mm/h 时,其中全氮占 72.24%,全磷占 74.62%,全钾占 71.83%。随降雨强度的逐渐增大,全氮流失量增大 1.19～1.29 倍,全钾流失量增大 1.14～1.26 倍。可见在降雨强度较小时,径流养分流失量在整个养分流失过程中也是不可忽视的养分流失途径之一。

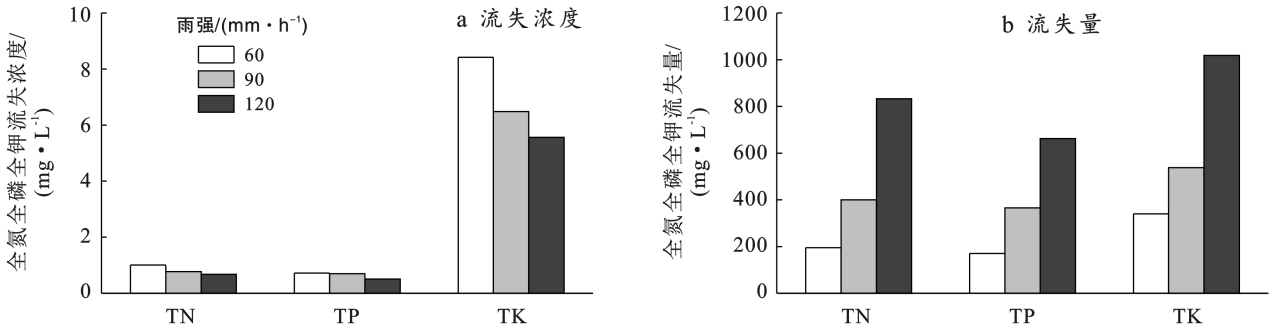

图 6　不同雨强条件下泥沙养分流失浓度及流失量变化

Fig.6　Changes in sediment nutrient loss concentration and amount under different rainfall intensities

表 1　不同降雨强度下流失泥沙养分富集率

Table 1　Nutrient enrichment rates of lost sediment under various rainfall intensities

降雨强度/(mm·h⁻¹)	养分富集率			径流/泥沙		
	全氮	全磷	全钾	全氮	全磷	全钾
60	1.79	0.84	0.22	1∶1.38	1∶1.33	1∶1.38
90	1.92	0.67	0.26	1∶1.16	1∶1.33	1∶1.21
120	1.92	0.70	0.41	1∶1.07	1∶1.16	1∶1.09

4　讨 论

降雨是水土流失和非点源污染的主要动力[17],降雨形成的径流对坡面冲刷带走泥沙,从而导致土壤侵蚀,而排土场作为较松散堆积体,其产流影响因素有很多,大量水分和养分随降雨强度的增大而流失,导致排土场土壤水分的亏缺和土壤养分的流失。本研究表明在排土场平台—边坡系统中,随着降雨强度的增加,各形态氮养分浓度都呈减小—增加—逐渐减小的趋势,这是由于雨滴对排土场打击动能增强,致使土壤的入渗能力下降,土壤中氮养分浓度随之减少。这与彭遥等[18]的研究结论一致。随着雨强的增加径流水样中磷有减小的趋势,主要是因为磷在土壤中易被固定,不易转移。钾浓度随着雨强增大而逐渐减少,总体趋势表现为:60 mm/h＞90 mm/h＞120 mm/h。主要是因为钾流失主要以地表流失为主。罗春燕[19]的研究发现,降雨强度对磷、钾的流失有一定的影响,是随着雨强的增加而增加,这与本研究结果不太一致,说明钾流失还与土壤类型有关,排土场—边坡径流养分流失规律和其他地区有所不同,因此,今后应该加强排土场地下构造对养分浓度影响的研究。

降雨强度对排土场养分的总流失量有很大影响,随着降雨强度的提升,氮、磷、钾等的养分流失量也随之增加。主要是因为降雨初期地表不产流,土壤中大量的氮随雨水下渗,导致径流中全氮流失量增加而造成的。而不同形态磷在土壤中的迁移特性,以及雨强对径流冲刷作用的强化导致磷的流失量随雨强增大而增加。而钾具备较强的水溶性,导致其随径流的发生而流失。杨任翔等[20]研究表明溶解态氮磷和可溶性磷流失量都随坡面降雨量增加而呈上升趋势,这与本研究结果一致。根据各降雨强度下的 TN,TP,TK 流失浓度及流失量情况,可以看出,其浓度均随降雨强度的增大而减小,其流失量均随降雨强度的增大而增大。汤珊珊等[21]研究表明将坡面泥沙的养分流失与坡面径流的养分流失看作一体。从本研究来看,在暴雨条件下,泥沙有养分富集特征,全氮的富集率最大,能够达到 1.92。富集率 ER 随着降雨强度增加逐渐增加,全氮的富集率＞1,全磷、全钾的富集率＜1。通过对径流流失量与泥沙流失量的比例分析可知,随着雨强的增大,TN,TP,TK 的流失量均呈增大趋势,其中 TN 流失量增大 1.19～1.29 倍,TK 流失量增大 1.14～1.26 倍。由此可知,在暴雨作用下,其流失总量相对泥沙流失总量可以忽略不计,在雨强较小时,径流养分流失量不可忽略。

5　结 论

(1) 排土场平台—边坡系统土体养分流失浓度

主要受降雨强度和土壤本身两个因素的共同影响。暴雨作用下土壤中氮、磷养分浓度随降雨强度的变化减少，土壤中的钾养分浓度随降雨历时变化不明显。

(2) 降雨强度对全氮、全磷、全钾养分流失量影响显著，泥沙养分流失量均大于径流养分流失量；泥沙养分流失浓度均大于地表径流中的养分浓度，应当注重泥沙养分流失防治。

(3) 排土场平台—边坡系统土壤泥沙氮、磷、钾均有富集现象，大部分土壤对磷有固定作用，磷本身的迁移能力不强，磷的富集率逐渐减小。

参考文献(References)

[1] 魏忠义，白中科.露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J].煤炭学报，2003，28(5)：486-490.
Wei Zhongyi, Bai Zhongke. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 486-490.

[2] Boruvka L, Kozák J, Mühlhanselová M, et al. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 113: 118-123.

[3] 匡文龙，邓义芳.采煤塌陷地区土地生态环境的影响与防治研究[J].中国安全科学学报，2007，17(1)：116-120.
Kuang Wenlong, Deng Yifang. Probe into the soil environmental impact of coal mining collapsed area and its prevention and cure measures[J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2007, 17(1): 116-120.

[4] 郑小斌，李志国，刘永杰，等.覆土厚度和边坡形态对排土场边坡稳定性的影响[J].矿业研究与开发，2024，44(8)：91-97.
Zheng Xiaobin, Li Zhiguo, Liu Yongjie, et al. Influence of soil cover thickness and slope geometry on the stability of mine waste dump [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 91-97.

[5] 赵伟璇，王彤彤，沈浩伟，等.锡林浩特露天煤矿排土场不同恢复措施植被群落特征分析[J].草地学报，2024，32(7)：2214-2224.
Zhao Weixuan, Wang Tongtong, Shen Haowei, et al. Analysis of vegetation community characteristics under different restoration measures in Xilinhot open-pit coal mine dump [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2214-2224.

[6] 吕刚，李叶鑫，宁宝宽，等.暴雨作用下排土场平台—边坡系统土壤侵蚀过程模拟研究[J].煤炭学报，2021，46(5)：1463-1476.
Lü Gang, Li Yexin, Ning Baokuan, et al. Soil erosion process of platform-slope system of dump under heavy rain [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1463-1476.

[7] 姜倩，李坤衡，李宏伟，等.辽西春季解冻期褐土工程堆积体坡面产流产沙模拟试验研究[J].水土保持学报，2021，35(2)：15-21.
Jiang Qian, Li Kunheng, Li Hongwei, et al. Simulation test on runoff and sediment yield of cinnamon soil engineering accumulation slope during spring thawing period in Western Liaoning Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 15-21.

[8] 张雅楠.不同覆土厚度下排土场土壤侵蚀与养分流失研究[D].辽宁 阜新：辽宁工程技术大学，2023.
Zhang Yanan. Study on soil erosion and nutrient loss in dump under different soil cover thickness [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2023.

[9] Jia Lizhi. Soil and water management: Practices to mitigate nutrient losses in agricultural watersheds [J]. Water, 2024, 16(16): 2269.

[10] 李晗，吕刚，李叶鑫，等.露天煤矿排土场不同植被恢复模式土壤养分和酶活性的差异性[J].生态学杂志，2022，41(5)：919-924.
Li Han, Lü Gang, Li Yexin, et al. The differences of soil nutrients and enzyme activities of different vegetation restoration models in opencast coal mine dump [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 919-924.

[11] 李波，李晔，韩惟怡，等.人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析[J].水土保持学报，2016，30(3)：39-43.
Li Bo, Li Ye, Han Weiyi, et al. Loss characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of different sizes under artificial rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 39-43.

[12] 高儒学，戴全厚，甘艺贤，等.不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J].土壤学报，2019，56(5)：1072-1084.
Gao Ruxue, Dai Quanhou, Gan Yixian, et al. Characteristics of nutrient loss from sloping farmland in karst region as a function of rainfall intensity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1072-1084.

[13] 马琨，王兆骞，陈欣，等.不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J].水土保持学报，2002，16(3)：16-19.
Ma Kun, Wang Zhaoqian, Chen Xin, et al. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(3): 16-19.

[14] 秦华，李晔，李波，等.人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律[J].水土保持学报，2016，30(1)：1-4.
Qin Hua, Li Ye, Li Bo, et al. Nutrient loss of limestone soil under artificial simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 1-4.

(下转第 104 页)

Peng Yong, Liang Wu, Peng Rimin, et al. Investigation of distribution and harm of wild plant resources in golden tea field [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2018,30(2):23-26.

[23] 王夏青,彭保发,李福春,等.黄土高原聚湫沉积旋回特征及地球化学划分[J].土壤,2018,50(5):1046-1054.
Wang Xiaqing, Peng Baofa, Li Fuchun, et al. Features and geochemical identification index of deposition couplets in landslide-dammed reservoirs on Loess Plateau of China [J]. Soils, 2018,50(5):1046-1054.

[24] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results [J]. Journal of Paleolimnology, 2001,25(1):101-110.

[25] Lü Feiya, Wang Xiaqing, Liu Fenggui, et al. Vegetation, temperature, and Indian Summer Monsoon evolution over the past 4 400 years revealed by a pollen record from Drigo Co on the Southern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2024, 655:112556.

[26] 王乐,董雷,胡天宇,等.中国植被图编研历史与展望[J].中国科学(生命科学),2021,51(3):219-228.
Wang Le, Dong Lei, Hu Tianyu, et al. History and prospect of vegetation map compilation in China [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2021,51(3):219-228.

[27] 崔亦凡,秦锋,赵艳,等.孢粉多样性能否反映植被多样性?:以中国东北地区为例[J].中国科学:地球科学,2023,53(9):2127-2138.
Cui Yifan, Qin Feng, Zhao Yan, et al. Does palynological diversity reflect floristic diversity?: A case study from Northeast China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023,53(9):2127-2138.

[28] 刘艳杰,黄伟,杨强,等.近十年植物入侵生态学重要研究进展[J].生物多样性,2022,30(10):276-292.
Liu Yanjie, Huang Wei, Yang Qiang, et al. Research advances of plant invasion ecology over the past 10 years [J]. Biodiversity Science, 2022,30(10):276-292.

[29] 白剑波.陕北黄土高原丘陵沟壑区油松飞播造林成效调查[J].陕西林业科技,2012,40(6):31-33.
Bai Jianbo. Effect of ariel afforestation with pinus tabulaeformis in Loess Plateau of North of Shaanxi [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2012,40(6):31-33.

[30] 凤紫棋,孙文义,穆兴民,等.黄土高塬沟壑区植被恢复方式对小流域土壤水分的影响[J].中国水土保持科学,2023,21(4):1-10.
Feng Ziqi, Sun Wenyi, Mu Xingmin, et al. Effects of vegetation restoration methods on soil moisture in the small basins of Loess Plateau Gully Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(4):1-10.

(上接第 64 页)

[15] 李昌兰.喀斯特典型坡耕地土壤养分流失试验研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2016.
Li Changlan. Experimental study on soil nutrient loss in typical karst sloping cropland [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University,2016.

[16] 翟元晓,李彦旻,崔胜辉,等.丽江市漾弓江流域水体氮负荷及污染源特征研究[J].环境科学学报,2022,42(7):329-337.
Zhai Yuanxiao, Li Yanmin, Cui Shenghui, et al. Study on the characteristics of water nitrogen load and pollutant source of the Yanggongjiang Watershed, Lijiang City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(7):329-337.

[17] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
Wang Shuaibing, Song Yali, Wang Keqin, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(13):160-169.

[18] 彭遥,周蓓蓓,陈晓鹏,等.间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):54-60.
Peng Yao, Zhou Beibei, Chen Xiaopeng, et al. Study on the mechanism of soil, water and nutrient loss on loess slope under interval rain events [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(3):54-60.

[19] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):24-27.
Luo Chunyan, Tu Shihua, Pang Liangyu, et al. Effect of rain intensity on nutrient losses from sloping land of purple soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(4):24-27.

[20] 杨任翔,邱凡,郑佳舜,等.赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J].生态学报,2022,42(3):904-913.
Yang Renxiang, Qiu Fan, Zheng Jiashun, et al. Characteristics of runoff and the dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):904-913.

[21] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等.模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J].土壤学报,2016,53(1):39-47.
Tang Shanshan, Li Peng, Ren Zongping, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(1):39-47.