

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.001.

陈佳, 范萍萍, 龙文涛, 等. 土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 460-470.

Chen Jia, Fan Pingping, Long Wentao, et al. Research Progress in Mechanism of Impact of Soil Erosion on Heavy Metal Migration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 460-470.

土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展

陈佳, 范萍萍, 龙文涛, 邵良

(贵州大学 农学院, 贵阳 550025)

摘要: [目的]揭示土壤侵蚀作用下重金属的迁移规律, 阐明重金属在土壤侵蚀作用下的迁移机制, 为重金属的污染防治提供科学指导。[方法]基于国内外有关土壤侵蚀作用下重金属迁移的文章, 从土壤性质、重金属性质、环境因子 3 方面就土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制进行系统研究。[结果](1) 侵蚀作用下土壤重金属主要以颗粒态形式进行横向/纵向迁移, 溶解态重金属迁移占比小但活性强, 侵蚀造成沉积区的泥沙特性与侵蚀区土壤存在差异, 可能影响重金属富集特征的空间分布格局;(2) 土壤 pH、有机质和黏粒含量越高, 吸附重金属的能力越强, 重金属被释放迁移的能力越弱;(3) 土壤重金属的赋存形态对其迁移方式有影响, 一般溶解态重金属主要来源于有效态, 而相对稳定的残渣态通常以颗粒态形式迁移;(4) 降雨、地形、植被等环境因子影响泥沙颗粒的迁移过程, 并优先迁移细颗粒, 使泥沙粒径分布随迁移路径呈一定的变化规律。[结论]侵蚀作用下重金属迁移受土壤—重金属性质及环境因子等多种因素影响, 未来研究可重点关注不同地质背景与污染成因条件下土壤侵蚀对重金属迁移过程的影响; 不同粒径土壤颗粒的重金属赋存形态异质性研究; 喀斯特地下漏失对重金属迁移的作用机理, 探究不同侵蚀条件下重金属地表流失与地下漏失的分配机制。

关键词: 土壤侵蚀; 重金属迁移; 泥沙颗粒; 赋存形态

中图分类号: S157.1; X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0460-11

Research Progress in Mechanism of Impact of Soil Erosion on Heavy Metal Migration

Chen Jia, Fan Pingping, Long Wentao, Tai Liang

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the migration rule of heavy metals under soil erosion, clarify the migration mechanism of heavy metals under soil erosion, and provide scientific guidance for the prevention and control of heavy metal pollution. [Methods] Based on the domestic and foreign articles on the migration of heavy metals under soil erosion, the role of soil erosion on the migration of heavy metals was systematically summarized from three aspects: soil properties, heavy metal properties, and environmental factors. [Results] (1) Under erosion, the soil heavy metals mainly migrate horizontally and vertically in the form of particles, and the dissolved heavy metals account for a small proportion but have strong activity. The sediment characteristics of the sediment area caused by erosion are different from those of the soil in the erosion area, which may affect the spatial distribution pattern of heavy metal enrichment characteristics. (2) The higher the soil pH, organic matter, and clay content, the stronger the ability to adsorb heavy metals, and the weaker the ability of heavy metals to be released and migrated. (3) The speciation of heavy metals in soil plays an important role in their migration form. Generally, dissolved heavy metals mainly come from the available form, while relatively stable residual forms usually migrate in the particulate form.

收稿日期: 2023-02-05

修回日期: 2023-02-25

资助项目: 自然资源部开放课题基金“喀斯特区浅层岩溶裂隙土壤漏失对 Cd 迁移的影响机制”(YRSW-2023-086)

第一作者: 陈佳(1983—), 男, 安徽铜陵人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: chen_li@nwafu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

(4) Environmental factors such as rainfall, terrain, and vegetation affect the migration process of sediment particles, and prioritize the migration of fine particles, resulting in a certain variation pattern of sediment particle size distribution along the migration path. [Conclusion] Heavy metal migration under erosion is affected by soil/heavy metal properties and environmental factors. Future research can focus on: the impact of soil erosion on the migration process of heavy metals under different geological backgrounds and pollution causes; study on the heterogeneity of heavy metal speciation in soil particles with different particle sizes; the mechanism of underground leakage in karst areas on the migration of heavy metals, and the distribution mechanism of heavy metal surface loss and underground leakage under different erosion conditions.

Keywords: soil erosion; heavy metal migration; sediment particle; speciation of heavy metal

土壤是人类赖以生存的物质基础,是地球化学元素循环的重要载体。伴随工业、农业和城镇化的高速发展,矿山开采、污水灌溉及尾气排放等人类活动产生了大量污染物,导致土壤污染问题日益凸显,其中重金属污染尤为突出^[1]。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示我国土壤重金属点位超标率高达16.1%,其中Cd, Hg, Pb等重金属污染最为严重,我国当前受重金属污染的耕地面积超过200万 hm^2 ^[2-3]。

重金属污染物具有隐蔽性、长期性、不可逆性及难以降解等特点,且极易在土壤中富集,严重影响土壤植物、动物和微生物的生长,并通过食物链逐级迁移累积而危害人体健康。重金属迁移是当前环境土壤学研究的热点,主要侧重土壤剖面淋溶、土壤—作物系统迁移富集及转化机理等^[4-5],但土壤侵蚀(本文特指土壤水蚀,即降雨条件下土壤发生分离、搬运及沉积的过程)对重金属迁移的影响研究关注不够。土壤侵蚀是重金属在环境中迁移的重要驱动力,造成重金属从土壤向水体扩散,其中横向迁移导致流域下游面源污染,纵向迁移致使地下水污染的风险增大(尤其在喀斯特地区),严重威胁区域生态安全。

侵蚀作用下,土壤重金属随径流、泥沙迁移是一个极其复杂的过程,主要迁移方式为颗粒态和溶解态,其迁移过程受诸多因素影响,如土壤性质、重金属性质、环境因子等。有研究认为土壤团聚体粒径大小与重金属含量呈负相关,即细小土壤颗粒富集重金属能力更强^[6],但Huang等^[7]人发现重金属富集于大团聚体;不同赋存形态的重金属的溶解性、迁移性等存在较大差异,一般认为残渣态的重金属迁移能力最弱,交换态的重金属迁移能力较强;此外,有研究表明降雨强度与重金属迁移量呈正相关^[8],但也有研究发现降雨强度与重金属迁移量呈负相关^[9];由此可见,单个研究很难深入认识土壤侵蚀作用下的重金属迁移规律与机制,因此很有必要从多角度进行系统综述。

基于此,本文从重金属的迁移方向入手,分别阐明土壤侵蚀作用下重金属的纵向、横向迁移规律,再

从土壤性质、重金属性质、环境因子等角度对土壤侵蚀过程中重金属的迁移机制进行分析,旨在深入认识侵蚀作用下的重金属迁移机理,以期为同步开展土壤侵蚀与重金属污染防治提供科学依据。

1 侵蚀作用下土壤重金属的迁移规律

侵蚀条件下土壤经雨滴击溅、径流冲刷而发生分离、搬运和沉积,在此过程中重金属随径流、泥沙以溶解态、颗粒态的形式发生纵向、横向迁移。

1.1 土壤重金属的纵向迁移

降雨在地表沿土壤剖面发生垂向的淋溶作用,重金属随土壤颗粒、壤中流由表层向深层迁移,从而改变了重金属的剖面分布格局,甚至进入地下水而污染水源。

不同土层重金属的分布特征存在显著差异。通常重金属富集于表层土壤(0—20 cm),并由表土至底土总体呈逐渐递减的趋势,这可能与有机质含量随深度增加不断减少有关。窦韦强等^[10]对不同土层(0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm)重金属含量进行探究,结果显示Cu, As, Pb, Zn, Cd和Hg 6种重金属均随土层深度增加逐渐减少,但Cr呈逐渐增加趋势, Ni表现为先降低后逐渐增加;邹慧等^[11]也得出相似结论,即Cu, Hg两种重金属元素主要富集于7 cm土层,随土层深度增加呈降低趋势,但Pb随土层深度表现为先增后减趋势,在47 cm处出现最大值,这可能是土壤重金属垂直迁移速率受重金属自身性质影响。姜玉玲^[12]研究表明在外源污染或地质高背景的作用下重金属含量由表土至底土呈逐渐升高趋势。

侵蚀作用下颗粒态与溶解态重金属剖面迁移量存在差异。王浩等^[13]发现淋溶过程中Pb, Cu的溶解态重金属含量低于颗粒态;溶解态Pb为3.84 $\mu\text{g/L}$,而颗粒态Pb达18.28 $\mu\text{g/L}$,这可能是因为重金属容易被土壤颗粒所吸附,且土壤重金属稳定形态占比高,不易释放至水体,导致重金属主要以颗粒态形式进行垂直迁移。章明奎等^[14]也得出类似结论,即重金属纵向迁移形式主要为颗粒态。舒晓晓等^[15]开展的淋溶试验明:粒径<1

mm 的土壤颗粒能释放更多 Pb^{2+} ，土壤粒径大小也会影响剖面重金属迁移量。目前有关颗粒态重金属剖面迁移的粒径大小研究关注不多。

喀斯特区因特殊地质构造而存在地表/地下二元空间结构,导致重金属随径流、泥沙通过岩溶孔隙、漏斗等发生地下漏失^[16]。土壤漏失是重力侵蚀、化学溶蚀、水力侵蚀多重作用的结果,受孔隙、地形和降雨强度等因素影响^[17]。有研究发现,雨强和坡度较小的喀斯特地区土壤流失以地下漏失为主,而雨强和坡度较大地区的土壤主要通过地表流失^[18]。此外,周春衡^[19]研究表明地下漏失过程迁移的泥沙主要是 $<2\text{ mm}$ 的细小土壤颗粒。目前已有研究开始探讨喀斯特地下漏失过程相关机理,但关于喀斯特土壤侵蚀作用下重金属随土壤漏失迁移的认识依然薄弱。

1.2 土壤重金属的横向迁移

土壤经雨滴击溅破碎分离,泥沙颗粒随径流迁移

表 1 侵蚀区与沉积区重金属溶解态、颗粒态百分比

| 区域 | 参考文献 | Cu | | Pb | | Cd | |
|-----|----------------------------|-------|-------|------|--------|-------|-------|
| | | 溶解态 | 颗粒态 | 溶解态 | 颗粒态 | 溶解态 | 颗粒态 |
| 侵蚀区 | 陶权等 ^[21] | 0.79 | 99.21 | 0.00 | 100.00 | | |
| | 赵世杰 ^[22] | 1.12 | 98.88 | 0.00 | 100.00 | 7.75 | 92.25 |
| | 梁涛 ^[23] | 0.04 | 99.96 | 0.02 | 99.98 | | |
| | 邓江堤 ^[24] | | | 0.64 | 99.36 | 11.61 | 88.39 |
| | 均值 | 0.65 | 99.35 | 0.33 | 99.67 | 9.68 | 90.32 |
| 沉积区 | Geng et al ^[25] | 28.34 | 71.66 | 1.93 | 98.07 | 40.78 | 59.22 |
| | Kerr et al ^[26] | 54.83 | 45.17 | 1.84 | 98.16 | 10.85 | 89.15 |
| | Qiao et al ^[27] | | | 0.04 | 99.96 | 0.30 | 99.70 |
| | 均值 | 41.59 | 58.41 | 1.27 | 98.73 | 17.31 | 82.69 |

侵蚀区和沉积区重金属含量占比也表现出较明显的规律性。由表 1 知,溶解态重金属占比表现为沉积区 $>$ 侵蚀区,颗粒态重金属占比特征为侵蚀区 $>$ 沉积区,其原因可能是:水流作用使河流沉积物再次悬浮,有助于沉积物中重金属的释放^[20];与颗粒态重金属相比,溶解态重金属迁移能力更强,迁移范围更广,易随径流汇入河流^[27]。

综上,土壤侵蚀作用下重金属主要以溶解态和颗粒态的形式发生迁移。溶解态重金属的一部分随剖面淋溶进入深层土壤或地下水,另一部分随地表径流汇入受纳水体;而颗粒态重金属则主要受到径流搬运作用的影响在环境中运移和再分布。因较强的吸附作用,颗粒态是重金属进行横向/纵向迁移的主要形式,侵蚀过程导致沉积区泥沙的重金属含量有别于侵蚀区土壤(图 1)。上述研究表明土壤性质、重金属性质和环境因子是影响侵蚀作用下重金属迁移的关键因素,因此有必要做进一步分析阐述。

最终沉积于洼地/谷地或汇入河流。侵蚀是土壤重金属迁移的重要动力,当产沙量大于土壤搬运能力时发生沉积。由于中上坡土壤易被冲刷流失,土壤易在下坡沉积,因此一般在坡面尺度可认为中上坡为侵蚀区,下坡为沉积区。对流域来说,上游可认为是侵蚀区,下游为沉积区;而对于海洋—陆地系统,可认为陆地为侵蚀区,海洋为沉积区。

通过梳理分析土壤侵蚀作用下溶解态与颗粒态重金属迁移占比发现(表 1):溶解态重金属占比基本都小于颗粒态重金属占比,如溶解态 Pb 占比变化区间为 $0\sim1.93\%$,颗粒态 Pb 占比变化区间为 $98.07\%\sim100\%$ 。说明侵蚀作用下土壤重金属主要以颗粒态形式迁移。但 Kerr 等^[20]发现颗粒态 Cu 占比小于溶解态 Cu,这可能是由于研究区流域内 Cu 与沉积物的亲和力较低,导致与溶解态 Cu 相比,以颗粒态 Cu 形式迁移的重金属含量较少。

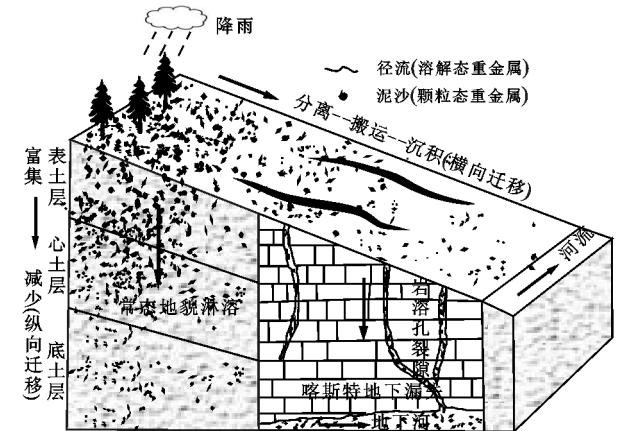


图 1 土壤侵蚀作用下重金属横向/纵向迁移规律

Fig. 1 The horizontal/vertical migration of heavy metals under soil erosion

2 侵蚀作用下土壤性质对重金属迁移的影响

土壤性质是决定土壤侵蚀强度的关键要素。土

壤侵蚀引起水土流失/漏失,导致土壤退化,进而影响甚至改变土壤性质。有研究表明土壤团聚体、pH、有机质、土壤质地等在侵蚀作用下重金属的迁移过程中扮演重要角色。

2.1 土壤团聚体对重金属迁移的影响

团聚体是土壤的重要组成和基本功能单元。土壤侵蚀导致团聚体结构的破碎,降雨条件下团聚体破碎是侵蚀泥沙的主要来源。团聚体性质不仅影响土壤分离、搬运过程还决定土壤的孔隙数量与大小,进而影响侵蚀泥沙量及重金属的富集能力。团聚体结构的破坏,一方面使土壤颗粒分离,促进土壤表层形成致密层,减少侵蚀泥沙量^[21];另一方面,土壤颗粒分散可增加黏粒含量,黏粒对重金属有较强的吸附能力,因此泥沙颗粒中重金属的富集程度会相应增加^[28]。土壤团聚体性质(粒径、含水量)与侵蚀过程中重金属的迁移行为密切相关。

团聚体粒径大小与重金属的富集程度显著相关。通常将直径 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体称为大团聚体,直径 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体称作微团聚体^[29]。程剑雄等^[30]研究发现不同粒径土壤团聚体中重金属含量由大到小排列顺序为 $0.05\sim0.25\text{ mm}$, $<0.05\text{ mm}$, $0.25\sim2.00\text{ mm}$ 。重金属含量的峰值一般存在于细土壤颗粒,与大团聚体相比,外源重金属存在向细土壤颗粒优先吸附的倾向,且微团聚体有效态重金属含量比大团聚体含量高^[31]。细颗粒比表面积较大且含有较多黏粒矿物和铁锰氧化物^[32],有利于土壤重金属的吸附,负电荷能有力提高土壤颗粒对重金属的亲合力。但也有研究得出不同结论,龚仓等^[33]对热带林地土壤团聚体中重金属的含量与分布进行研究发现 Pb 不仅富集于微团聚体($<0.25\text{ mm}$),在 $0.25\sim1\text{ mm}$ 粗颗粒中也存在富集,这与 Xiao 等^[34]发现重金属在粗颗粒中富集的研究结果相似,可能是因为细颗粒聚合形成大团聚体导致该现象发生。土壤侵蚀作用对团聚体冲击力越强,大团聚体更易破碎分离形成微团聚体,有利于重金属吸附。

土壤团聚体的含水量影响团聚体破碎机制,不同破碎方式影响土壤孔隙状况和径流系数进而影响重金属迁移量。降雨侵蚀条件下团聚体破碎形式有快速湿润引起的消散作用、机械外力作用和土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破裂作用^[35]。含水量较低的情况下团聚体破碎机制主要是快速湿润造成的消散作用,含水量较高时以机械外力作用和土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破裂为主^[36],其中消散作用破坏效果最显著。水分进入团聚体使其内部空气受到挤压,压强逐渐变大,当压强大于团聚体自身内聚力

时就会发生气爆反应^[37],因此当干旱地区出现强降雨时,土壤更易发生侵蚀现象。团聚体的结构被破坏会形成粒径更小的土壤颗粒,细颗粒不仅富集重金属的能力强,并且细颗粒与粗颗粒相比更易随径流迁移。不同破碎方式通过影响土壤颗粒的大小、孔隙数量决定径流强度和重金属迁移量,土壤湿润速度对团聚体的破坏作用比雨水的冲击作用更为强烈。

2.2 土壤 pH 对重金属迁移的影响

土壤 pH 是影响侵蚀过程中重金属迁移的重要因子。降雨的酸碱度会影响土壤 pH,若为酸雨,则会增加土壤酸度,降低土壤 pH。通常重金属的吸附能力与土壤 pH 呈正相关,pH 越高,土壤吸附重金属的能力越强,可有效抑制侵蚀作用下重金属的释放迁移量^[38]。pH 与有效态重金属含量呈负相关,土壤 pH 升高, H^+ 含量降低,负电荷增加, H^+ 与重金属离子竞争吸附位点的能力降低,土壤中游离态的重金属离子含量降低^[39]。

pH 降低可提高重金属溶解度,增强侵蚀作用下土壤重金属的迁移能力。蒋建清等^[40]研究表明 pH 由 6.0 降至 2.0 时,表层土壤(0—10 cm)中的 Cd, Pb, Cu, Zn 的迁移能力均增强。pH 增大,重金属易形成碳酸盐和氢氧化物。陈涛等^[41]研究发现当土壤 pH 为 4.0 时,土壤重金属 Cd 释放率 $>50\%$;pH >6.0 时,其易形成氢氧化物沉淀;但有些重金属离子在环境中通常以氧阴离子形式存在(如 As, Sb),pH 升高更利于其迁移。

2.3 土壤有机质对重金属迁移的影响

土壤有机质含量与重金属含量和侵蚀强度密切相关。有机质中含有各种络合官能团、螯合基团(羟基、羧基),其通过与重金属离子发生络合或螯合作用吸附重金属,降低土壤重金属的迁移能力^[43]。通常来说,有机质含量越高,吸附重金属的能力越强,侵蚀强度越小,土壤侵蚀过程中重金属的迁移量也越小^[44]。

2.4 土壤质地对重金属迁移的影响

根据机械组成的不同(砂粒($2\sim0.02\text{ mm}$)、粉粒($0.02\sim0.002\text{ mm}$)、黏粒($<0.002\text{ mm}$)),土壤可分为砂土、壤土和黏土。土壤抗蚀性与土壤质地显著相关,安文涛^[45]研究指出由于砂土土粒较分散,相对于有机质含量较多的黏土,砂质土壤的可蚀性更强。

土壤质地与土壤颗粒吸附重金属的能力关系密切。黏粒和粉粒有机质含量较高,因此黏粒、粉粒占比较高的黏土、壤土吸附重金属能力较强。砂土土壤孔隙大,保水性差,不利于产生地表结皮,地表产流量较少,但能显著提高土壤重金属的垂直淋溶速率^[46]。

砂粒占比较高的土壤会抑制其对重金属的吸附作用。Ljung 等^[47]发现砂粒占比从 13% 增加到 58%

时,土壤细颗粒与粗颗粒所吸附的重金属含量的比值增加 1.1~3.7 倍,砂粒增多会减少土壤颗粒中的吸附位点数,降低土壤吸附重金属的能力,此时土壤吸附重金属的能力主要取决于土壤颗粒的粒径大小。

3 侵蚀作用下重金属性质对土壤重金属迁移的影响

重金属通过吸附、溶解、沉淀、络合、螯合等多种理化过程进入土壤并形成不同形态而富集或迁移。不同重金属及其形态的理化性质各异,进而影响侵蚀作用下重金属的迁移过程。

3.1 赋存形态对土壤重金属迁移的影响

与重金属总量相比,土壤侵蚀作用下重金属的迁移量与赋存形态的关系更密切^[48]。不同赋存形态重金属的生物有效性存在较大差异。国际上通常采用改进的 BCR 法和 Tessier 法对重金属的赋存形态进行提取。改进的 BCR 连续提取法将重金属分为弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态^[49]。Tessier 连续提取法将重金属分为可交换态(水溶态、交换态)、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态^[50]。其中改进的 BCR 连续提取法中的弱酸提取态相当于 Tessier 连续提取法中的交换态与碳酸盐结合态之和,可还原态相当于铁锰氧化物结合态,可氧化态相当于有机结合态^[51]。

一般将改进的 BCR 连续提取法中除残渣态以外的其他 3 种形态称为有效态,有效态重金属易释放迁移,而残渣态重金属最稳定。通常不同形态重金属稳定性表现为残渣态>可氧化态>可还原态>弱酸提取态,其中弱酸提取态重金属迁移能力最强。

黄带娣等^[52]根据其试验结果推测侵蚀作用下生物有效性较强的重金属形态(弱酸提取态、可还原态)主要富集于土壤粗颗粒,稳定性较强的重金属形态(可氧化态、残渣态)主要吸附于土壤细颗粒。侵蚀过程中与粒径较大的土壤颗粒相比,细颗粒更易随径流迁移,侵蚀作用下重金属迁移形态主要为颗粒态中较稳定的可氧化态和残渣态。

侵蚀条件下重金属的不同赋存形态可相互转换。已有研究发现酸雨有助于将残渣态重金属转化为有效态,酸雨使土壤 pH 降低,从而提高重金属的迁移性^[53]。

3.2 重金属特性对土壤重金属迁移的影响

土壤重金属类型多样,不同重金属理化性质各异,导致侵蚀过程中各种重金属的迁移能力差异较大。根据性质可将重金属分为氧化难溶性(Fe^{3+} , Mn^{4+})和还原难溶性(Cd , Cr , Zn , Pb , Cu),两种类型重金属分别在氧化或还原条件下生成沉淀,减小侵蚀

作用下土壤重金属的迁移活性^[39]。

不同的重金属迁移能力不同。张加文等^[54]发现与 As, Cu, Zn 等 3 种重(类)金属相比, Cd, Pb 更易释放迁移。研究表明, Pb 的负电性较高,可与土壤中的铁铝/锰氧化物、有机质等形成共价化合物,或发生反应转变为铁锰氧化物结合态,铁锰氧化物结合态重金属迁移能力较强,土壤侵蚀作用下易随径流迁移^[55]。土壤有效 Cu 大部分以有机螯合态存在(>90%),与其他元素相比, Cu 更易形成络合物被土壤吸附^[56]。同时, Cu 是亲硫元素,还原条件下易沉淀为稳定的硫化物^[57],不易溶解于径流发生迁移。

不同重金属的生物有效性存在显著差异。柴小平等^[58]研究发现 Cd 主要呈弱酸提取态, Pb 主要呈可还原态。王图锦^[59]研究表明 Cu, Cr 主要呈残渣态, Pb 为残渣态与铁锰氧化物结合态, Cd 为可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态。由此可见,因试验对象、方法及研究区背景的差异导致研究结果迥异,但均可表明不同重金属的生物活性差异大,进而影响侵蚀作用下重金属的迁移能力。

4 侵蚀作用下环境因子对土壤重金属迁移的影响

土壤侵蚀强度除与土壤性质和重金属性质有关,还受外界环境因子的影响。土壤侵蚀过程中降雨特征、地形因子、植被覆盖等通过影响产流产沙过程进而影响重金属的迁移。

4.1 降雨对土壤重金属迁移的影响

马仁明等^[37]研究表明降雨强度越大,径流迁移物质能力越强,地表径流携带的溶解态与颗粒态重金属含量也相应增加。降雨强度与产流量、产沙量、壤中流关系为显著正相关,雨强越大,径流越多,剥蚀土壤能力越强,搬运泥沙越多,重金属迁移量也越大^[60]。周凌峰等^[61]研究发现 Cd, Zn 溶解态与颗粒态最大输出通量都发生于每年 6 月,最小输出通量在 1 月,每年 6 月是强降雨高峰期,产流产沙量最大,侵蚀迁移的重金属含量也随之增加^[25]。但朱昌宇等^[9]研究表明总 Cd、总 Pb 的迁移量均随降雨强度增大呈减小趋势,如 55 mm/h, 100 mm/h, 120 mm/h 雨强条件下发生迁移的 Cd 浓度分别为 0.65 $\mu\text{g/L}$, 0.56 $\mu\text{g/L}$, 0.35 $\mu\text{g/L}$, 弱降雨条件下虽然其径流量与泥沙量较少,但重金属富集程度却较高,因为径流携带的侵蚀泥沙颗粒更小,细颗粒具有更大的比表面积,利于吸附更多的重金属。

陶权等^[21]发现在相同雨强条件下,随降雨历时延长,产沙量呈现先降低后增加的趋势。初期冲刷效

应使降雨前期出现最大泥沙量,径流携带大量泥沙颗粒(尤其是细小颗粒),土壤颗粒态重金属含量也出现最大值;随着降雨的持续,疏松土壤颗粒减少,土壤表面形成致密层,泥沙量降低,颗粒态重金属迁移量减少;随降雨历时继续延长,致密层可被破坏,侵蚀泥沙量再次增多,携带迁移的重金属含量又再次升高^[62]。

4.2 地形对土壤重金属迁移的影响

侵蚀过程中坡度通过改变径流流速影响产沙量进而决定土壤重金属迁移量。一般认为侵蚀泥沙量随坡度增加而增大,坡度增加,坡面重力增大,有助于侵蚀泥沙搬运^[63]。但王瑄等^[64]研究显示坡度达到 21°后,随坡度增加产沙量反而减少,因为超过临界坡度,坡面有效降雨面积减小,导致侵蚀产沙量减少,其携带迁移的重金属含量相应减少。徐蝶等^[65]得出相似结论,其试验结果显示产沙量临界坡度为 20°。坡面侵蚀过程中重金属迁移量由雨强和坡度共同决定,小雨强缓坡条件下,主要由坡度影响侵蚀产沙量,进而影响重金属迁移量;雨强增大重金属迁移量取决于雨强,大雨强条件有利于产流产沙;小雨强陡坡地段,当坡度超过临界坡度,重金属迁移量取决于雨强^[66]。

土壤侵蚀过程中坡长对重金属迁移有影响。张新和等^[67]研究显示坡长增加有利于坡面片蚀、细沟/切沟侵蚀,且坡长增加可提高水流流速,有利于产流产沙,造成侵蚀作用下重金属迁移量的增加。也有学者认为小雨强、历时短的降雨事件中,坡长对侵蚀产沙量的影响很小^[68]。蔡强国^[69]对 20 m,40 m,60 m 不同坡长条件下的产沙量进行研究,发现存在临界坡长,产沙量随坡长增加呈先升高后降低的变化趋势,

20~40 m 坡长的产沙率最大。

4.3 植被对土壤重金属迁移的影响

植被对降雨有截留缓冲作用,在一定程度上减小了对土壤的击溅冲刷力,同时通过增加地面粗糙度减缓径流流速,从而降低土壤侵蚀速率。解明曙等^[70]认为植物根系有利于雨水入渗,减少径流。植物对重金属具有一定固定能力,杨洋等^[71]测定土壤重金属流失量证明其迁移量低于植物所吸收的有效态重金属含量。

土壤侵蚀作用下,重金属迁移量受植被覆盖度的影响。魏慧等^[72]研究指出植被覆盖度增加能显著提高土壤的抗侵蚀能力。吴蕾等^[73]认为随植被覆盖度的增加,侵蚀泥沙量逐渐减少,径流量先减小后增加,植被覆盖度为 60%时,减流效果最好,植被覆盖度的增加,产流产沙量降低,重金属迁移量减少。

由于不同植被类型拦截降雨的能力不同,导致侵蚀过程中的侵蚀泥沙量和径流量存在差异,进而影响重金属迁移量。王全九等^[74]研究发现黄土坡地不同植被类型中苜蓿可有效减缓土壤侵蚀速率。孙希华^[75]研究表明沂蒙山区不同植被中温带落叶灌丛和矮林的土壤侵蚀强度最大。

除前文所述机制外,由于土壤中还存在多种重金属,重金属之间的相互作用(协同作用、拮抗作用)、土壤微生物活动等均会影响重金属的生物有效性^[76],进而影响土壤侵蚀过程中重金属的迁移,相关机制仍有待深入研究。综上,从土壤性质、重金属性质和环境因子三方面综合考虑,土壤侵蚀对重金属迁移的作用机制集成概念框架见图 2。

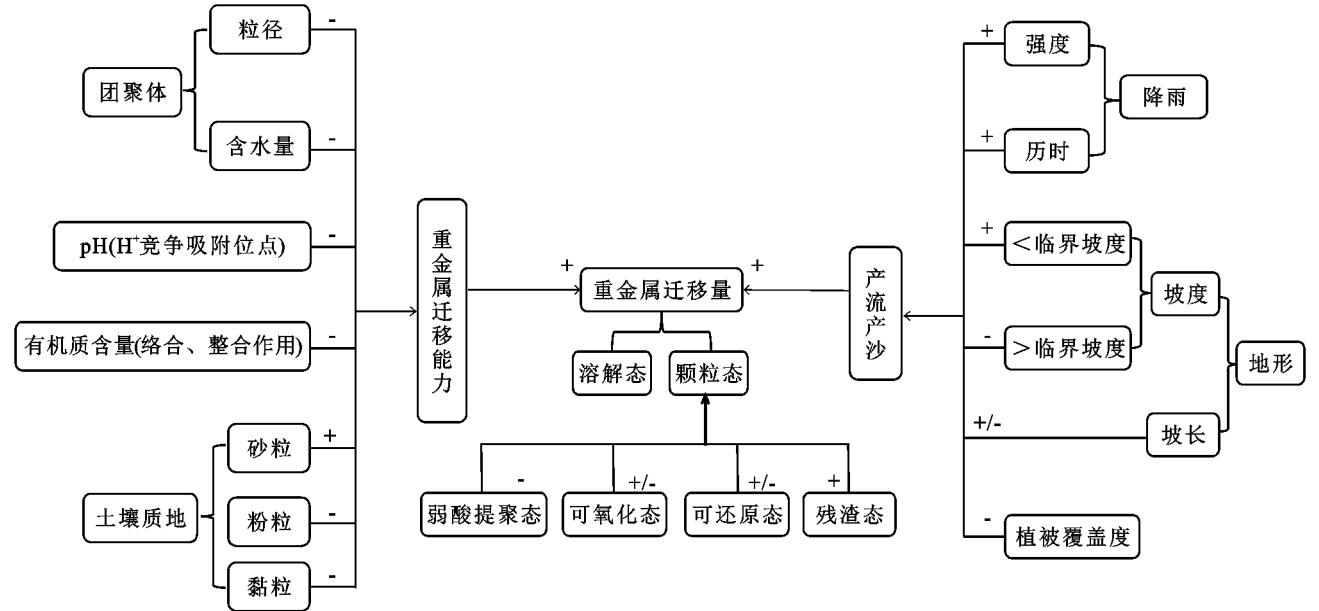


图 2 土壤侵蚀对重金属迁移的作用机制

Fig. 2 Mechanism of soil erosion on heavy metal migration

5 结论与展望

5.1 结论

本文从侵蚀作用下土壤重金属的横向/纵向迁移规律入手,依次从土壤性质、重金属性质、环境因子等方面对侵蚀过程中重金属的迁移机制进行论述,主要结论如下:

(1) 侵蚀作用下土壤重金属主要以溶解态和颗粒态的形式发生横向/纵向迁移,其中颗粒态是主导迁移形式,溶解态迁移比例虽小但活性强;侵蚀作用导致溶解态重金属的一部分随剖面淋溶进入深层土壤或地下水,另一部分随地表径流汇入水体;而颗粒态重金属在径流搬运作用下于环境中重新分布,使得沉积区泥沙特性与侵蚀区土壤存在一定差异,进而可能影响重金属富集特征的空间格局。

(2) 土壤吸附重金属的能力受土壤颗粒的粒径大小影响,土壤细颗粒吸附重金属的能力更强;侵蚀作用下土壤团聚体易破碎分离形成细颗粒,不仅有利于重金属富集,且易随径流优先迁移;一般土壤 pH 越小,重金属的活性越强,随径流溶解迁移的可能性越大;通常有机质含量越高,土壤抗蚀性越强,吸附重金属的能力越强,可抑制侵蚀作用下重金属的释放迁移。

(3) 重金属的赋存形态很大程度上决定了其在土壤中的迁移能力,有效态重金属易释放迁移(其中弱酸提取态迁移能力最强),而残渣态较稳定(一般以颗粒态形式迁移);侵蚀过程中随径流溶解迁移的重金属主要来源于有效态,有效态含量与溶解态迁移量成正比,因此赋存形态对重金属的迁移形式(溶解态、颗粒态)有重要影响。

(4) 降雨特征、地形因子和植被覆盖综合影响侵蚀泥沙颗粒在环境中的迁移过程,并表现出一定选择性,优先迁移小粒径的颗粒,使得泥沙粒径分布随迁移路径呈现一定的变化规律。

5.2 展望

国内外已开展了大量与土壤侵蚀及其环境效应有关的研究,但关于土壤侵蚀对重金属迁移的关注还不够,未来研究可重点考虑以下方面:

(1) 土壤重金属污染是自然和人为成因综合作用的结果,自然状态下土壤重金属主要来源于母岩成土过程,残渣态 Cd 占比高,活性低;工业、农业等人类活动是土壤 Cd 外源输入的主要途径,在工矿区和污水灌区重金属有明显的表层富集,以有效态为主,活性高;可见,地质背景与污染成因是影响重金属污染程度及其赋存形态的重要因素,进而影响侵蚀过程中土壤重金属的迁移方式;未来通过对比研究不同地质背景与污染成因条件下土壤侵蚀如何影响重金属的迁移过程具有重要科学意义。

(2) 土壤侵蚀优先输移细颗粒,一般小粒径土壤颗粒因比表面积大、有机质和黏土矿物含量高而更易富集重金属,但不同粒径土壤颗粒携带重金属的赋存形态是否存在差异未来可重点关注;另外,关于侵蚀作用下土壤重金属迁移机制研究主要采用室内模拟降雨试验法,但模拟试验条件与自然环境存在较大差异,今后可在天然降雨条件下开展坡面、小流域尺度的野外监测试验研究。

(3) 喀斯特土壤—表层岩溶带耦合发育易形成孔/裂隙管道系统,使得该区存在地表/地下双层水文结构,土壤侵蚀呈现地表流失/地下漏失的二元三维格局,在此背景下土壤重金属到底是以地表流失为主还是以地下漏失为主尚不清楚,未来可重点探究喀斯特地下漏失对重金属迁移的作用机制,明确不同侵蚀条件下重金属地表流失与地下漏失的分配机理,完善研究方法手段,探明相应过程与机制,为石漠化治理、水土保持及重金属污染防治提供科学依据。

参考文献:

- [1] Cadwalader G O, Renshaw C E, Jackson B P, et al. Erosion and physical transport via overland flow of arsenic and lead bound to silt-sized particles[J]. *Geomorphology*, 2011, 128(1):85-91.
- [2] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].*环境科学*,2020,41(6):2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in Arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020,41(6):2822-2833.
- [3] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].*水土保持研究*,2013,20(2):293-298.
Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013,20(2):293-298.
- [4] Ayad J Y. Long-term irrigation with treated municipal wastewater from the wadi-musa region:Soil heavy metal accumulation, uptake and partitioning in Olive Trees [J]. *Horticulturae*, 2021,7(152):1-13.
- [5] Xu J, Xiao P. Influence factor analysis of soil heavy metal based on categorical regression[J]. *International Acta Scientiae Circumstantiae and Technology*, 2021, 19:7373-7386.
- [6] Shi P, Schulin R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,618:210-218.
- [7] Huang B, Yuan Z J, Li D Q, et al. Loss characteristics of Cd in soil aggregates under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,650:313-320.
- [8] Waeles M, Riso R D, Le Corre P. Distribution and seasonal

- changes of lead in an estuarine system affected by agricultural practices: The Penzé estuary, NW France[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(3): 570-578.
- [9] 朱昌宇, 黄道友, 朱奇宏, 等. 模拟降雨条件下污染土壤中重金属元素径流迁移特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 49-53.
- Zhu C Y, Huang D Y, Zhu Q H, et al. Heavy metals loss characteristics with surface runoff under simulated rainfall conditions in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 49-53.
- [10] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. *环境工程*, 2021, 39(2): 166-172.
- Dou W Q, An Y, Qin L, et al. Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metals in farmland soils and ecological risk assessment[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2): 166-172.
- [11] 邹惠, 刘凯, 于玲玲, 等. 堆肥污泥中重金属形态分布及在矿山复垦过程中迁移转化研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(9): 43-47.
- Zou H, Liu K, Yu L L, et al. Speciation distribution of heavy metals in compost sludge and transformation in mine reclamation the process of[J]. *Environmental Science and Management*, 2022, 47(9): 43-47.
- [12] 姜玉玲, 阮心玲, 马建华. 新乡市某电池厂附近污灌农田重金属污染特征与分类管理[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 645-654.
- Jiang Y L, Ruan X L, Ma J H. Heavy metal pollution and classification management of sewage irrigation around a battery factory in Xinxiang, Henan province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 645-654.
- [13] 王浩. 土壤和道路沉积物中重金属的释放行为与固定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Wang H. Release behavior and immobilization of heavy metals in soil and road-deposited sediment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [14] 章明奎. 污染土壤中重金属的优势流迁移[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(2): 192-197.
- Zhang M K. Preferential transfer of the heavy metals in the polluted soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 192-197.
- [15] 舒晓晓, 魏雨露. 重金属铅污染土壤的淋溶特征研究[J]. *农业与技术*, 2021, 41(23): 64-66.
- Shu X X, Wei Y L. Study on the leaching characteristics of heavy metal lead contaminated soil[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(23): 64-66.
- [16] 刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 797-809.
- Liu N T, Liu H Y, Wu P, et al. Accumulation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical karst soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 797-809.
- [17] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. *地球与环境*, 2007, 35(3): 202-206.
- Zhang X B, Wang S J, He X B, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(3): 202-206.
- [18] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 1-8.
- Peng X D, Dai Q H, Li C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwestern karst of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 1-8.
- [19] 周春衡, 陈洪松, 付智勇, 等. 土壤大孔隙形态对喀斯特区水土漏失过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 70-76.
- Zhou C H, Chen H S, Fu Z Y, et al. Effect of soil macropore structures on soil and water loss progress in karst areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 70-76.
- [20] Kerr J G, Cooke C A. Erosion of the Alberta badlands produces highly variable and elevated heavy metal concentrations in the Red Deer River, Alberta[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596: 427-436.
- [21] 陶权, 姚景, 何树福, 等. 不同降雨强度下污染土重金属元素随径流迁移转化特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 65-68.
- Tao Q, Yao J, He S F, et al. Migration and transformation characteristics of heavy metals with surface runoff under different rainfall intensities in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 65-68.
- [22] 赵士杰. 喀斯特地区坡耕地土壤侵蚀对重金属元素迁移的影响机制[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- Zhao S J. The influence mechanism of soil erosion on the migration of heavy metal elements on slope farmland in karst areas[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [23] 梁涛, 王浩, 张秀梅, 等. 不同土地类型下重金属随暴雨径流迁移过程及速率对比[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1756-1760.
- Liang T, Wang H, Zhang X M, et al. Comparison of migration process and rate of heavy metals with rainstorm runoff under different land types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1756-1760.
- [24] 邓江堤, 张灿, 李宇, 等. 河岸缓冲带对采矿废弃地水土流失及其重金属污染扩散的消减效应[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(2): 325-335.
- Deng J D, Zhang C, Li Y, et al. Effect of ecological

- buffer patterns on abating soil erosion and heavy metal diffusion in riverbanks near mining waste catchments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(2):325-335.
- [25] Geng J, Wang Y, Luo H. Distribution, sources, and fluxes of heavy metals in the Pearl River Delta, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 914-921.
- [26] Qiao P, Lei M, Yang S, et al. Development of a model to simulate soil heavy metals lateral migration quantity based on SWAT in Huanjiang watershed, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 77:115-129.
- [27] 陈炎辉. 赤红壤坡地上污泥污染物随地表径流流失的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- Chen Y H. Study on contaminants transport along with runoff from sloping plots amended with sewage sludge on a lateritic red soil [D]. Fuzhou: Fujian A&F University, 2008.
- [28] 王继宇. 污染红壤重金属随地表径流迁移特征及影响因素研究[D]. 湖北荆州: 长江大学, 2014.
- Wang J Y. Characteristics and controlling factors of heavy metals transport by surface runoff from a contaminated red soil [D]. Jingzhou, Hubei: Changjiang University, 2014.
- [29] 董长勋, 熊建军, 李园. 土壤微团聚体基本性质及其对重金属吸附的研究进展[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 972-976.
- Dong C X, Xiong J J, Li Y. Study progress of basic properties and heavy metal adsorption in micro-aggregates of soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):972-976.
- [30] 程剑雄, 谢更新, 丁文川, 等. 化学淋洗对土壤团聚体稳定性及其重金属赋存形态的影响[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(4):86-96.
- Cheng J X, Xie G X, Ding W C, et al. Effect of chemical washing on the stability of soil aggregates and the form of heavy metals[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(4):86-96.
- [31] 王伟全, 徐冬莹, 杨文昊, 等. 污灌区土壤团聚体重金属含量分布特征研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3):701-709.
- Wang W Q, Xu D Y, Yang W H, et al. Distribution characteristics of heavy metals contents in soil aggregates of sewage irrigation area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3):701-709.
- [32] Huang B, Yuan Z J, Li D Q, et al. Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal(loid)s in soil: a review[J]. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 2020, 22(8):1596-1615.
- [33] 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 等. 典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):1094-1100.
- Gong C, Xu D D, Cheng H X, et al. Distribution characteristics and environmental significance of heavy metals in soil particle size fractions from tropical forests in China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1094-1100.
- [34] Xiao R, Zhang M, Yao X, et al. Heavy metal distribution in different soil aggregate size classes from restored brackish marsh, oil exploitation zone, and tidal mud flat of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16:821-830.
- [35] 史志华, 闫峰陵, 李朝霞, 等. 红壤表土团聚体破碎方式对坡面产流过程的影响[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(2):217-224.
- Shi Z H, Yan F L, Li C X, et al. The impact of fragmentation methods of red soil surface soil aggregates on slope runoff process[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2):217-224.
- [36] 李朝霞, 王天巍, 史志华, 等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 1-4.
- Li C X, Wang T W, Shi Z H, et al. Relationship between top soil structure changes and erosion process of red soil under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):1-4.
- [37] 马仁明. 降雨条件下鄂南几个红壤团聚体破碎特征及坡面侵蚀响应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Ma R M. Research on aggregates breakdown characteristics and responses of soil erosion in ultisols from south of Hubei province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [38] 白梅. 影响土壤中重金属淋溶的主要因素的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- Bai M. The research about the main factors which effect on the eluviation of heavy metals in soil [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [39] 张秋. 土地利用方式转变对重金属在土壤中吸附特征和形态分布的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Zhang Q. Effect of land use pattern change on the adsorption characteristics and form distribution of heavy metals in soil [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [40] 蒋建清, 吴燕玉. 模拟酸雨对草甸棕壤中重金属迁移的影响[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1995, 12(2):185-190.
- Jiang J Q, Wu Y Y. Study on the movement of heavy metals in meadow burozem affected by model acid precipitation[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 1995, 12(2):185-190.
- [41] 陈涛, 吴燕玉, 张学询, 等. 张士灌区镉土改良和水稻镉污染防治研究[J]. *环境科学*, 1980(5):7-11.
- Chen T, Wu Y Y, Zhang X X, et al. Research on cadmium soil improvement and rice cadmium pollution control in Zhangshi Irrigation District[J]. *Environmen-*

- tal Science, 1980(5):7-11.
- [42] 刘文政,贾亚琪,殷忠.贵阳污灌区菜地土壤团聚体中有机碳和重金属的含量特征及相关性分析[J].中国无机分析化学,2021,11(5):36-43.
- Liu W Z, Jia Y Q, Yin Z. Content characteristics and correlation of organic carbon and heavy metals in aggregates of wastewater irrigation soil of Guiyang[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021,11(5):36-43.
- [43] 吴敏,吴攀,李玲,等.西南喀斯特地区典型矿渣中砷、锑的赋存形态及其潜在风险评价[J].环境科学学报,2022,42(10):420-429.
- Wu M, Wu P, Li L, et al. The speciation and potential risk assessment of arsenic and antimony in typical mine tailings of karst areas, southwest China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(10):420-429.
- [44] 张倩,韩贵琳.贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价[J].环境科学,2022,43(6):3269-3277.
- Zhang Q, Han G L. Speciation characteristics and risk assessment of heavy metals from pudding karst critical zone, Guizhou province [J]. Environmental Science, 2022,43(6):3269-3277.
- [45] 安文涛,宋晓敏,蒋谦,等.坡面土壤侵蚀响应机制及其水动力学特征研究进展[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2020,41(4):61-66.
- An W T, Song X M, Jiang Q, et al. Research progress on response mechanisms of slope soil erosion and hydrodynamic characteristics[J]. Journal of North China University of Water Resources and Hydropower; Natural Science Edition, 2020,41(4):61-66.
- [46] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):45-49.
- Ma J L, Xu H H, Wang B, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping farmland of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):45-49.
- [47] Ljung K, Selinus O, Otabbong E, et al. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(9):1613-1624.
- [48] Adamo P, Iavazzo P, Albanese S, et al. Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2014,500:11-22.
- [49] 陈守莉,孙波,王平祖,等.污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素[J].土壤,2007,39(3):375-380.
- Chen S L, Sun B, Wang P Z, et al. Chemical form distribution of heavy metals in polluted paddy soils and its influencing factors[J]. Soil, 2007,39(3):375-380.
- [50] 付志平,冼子良,雷畅,等.3种连续提取法对矿区土壤和尾砂中 Pb 形态分析研究[J].广东化工,2022,49(6):80-83.
- Fu Z P, Xian Z L, Lei C, et al. Speciation analysis of Pb in soils and tailings surrounding mine area by three sequential extraction procedures[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022,49(6):80-83.
- [51] 李非里,刘丛强,宋照亮.土壤中重金属形态的化学分析综述[J].中国环境监测,2005,21(4):21-27.
- Li F L, Liu C Q, Song Z L. A review of fractionation of heavy metals in soils[J]. Environmental Monitoring in China, 2005,21(4):21-27.
- [52] 黄带娣.低潮位降雨及其径流对淤泥质潮间带水体重金属和营养盐的影响及其生态效应[D].深圳:深圳大学,2020.
- Huang D D. Effects of low tide rainfall-runoff on heavy metals and nutrients in intertidal water and their ecological effects[D]. Shenzhen:Shenzhen University, 2020.
- [53] Filius A, Streck T, Richter J. Cadmium sorption and desorption in limed topsoils as influenced by pH: isotherms and simulated leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 1998,27(1):12-18.
- [54] 张加文,田彪,罗晶晶,等.土壤重金属生物有效性影响因素及模型预测:中国毒理学会环境与生态毒理学专业委员会第七届学术研讨会[C].贵阳,2021.
- Zhang J W, Tian B, Luo J J, et al. Factors affecting the bioavailability of heavy metals in soil and model prediction:The 7th academic seminar of the environmental and ecological toxicology professional committee of the chinese society of toxicology[C]. Guizhou, 2021.
- [55] 聂亚平,王晓维,万进荣,等.几种重金属(Pb, Zn, Cd, Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J].生态科学,2016,35(2):174-182.
- Nie Y P, Wang X W, Wan J R, et al. Research progress on heavy metals (Pb, Zn, Cd, Cu) hyperaccumulation plants and strengthening measures of phytoremediation [J]. Ecological Science, 2016,35(2):174-182.
- [56] Geering H R, Hodgson J F. Micronutrient cation complexes in soil solution: III. Characterization of soil solution ligands and their complexes with Zn^{2+} and Cu^{2+} [J]. Soil Science Society of America Journal, 1969,33(1): 54-59.
- [57] Weber F, Voegelin A, Kretzschmar R. Multi-metal contaminant dynamics in Temporarily flooded soil under sulfate limitation[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2009,73(19):5513-5527.
- [58] 柴小平,母清林,余运勇,等.舟山渔场潮间带沉积物重金属形态分布特征及生态风险分析[J].环境污染与防治,2022,44(8):1054-1067.
- Chai X P, Mu Q L, She Y Y, et al. Speciation distribution and ecological risk of heavy metals in the intertidal sediments of Zhoushan Fishing Ground [J]. Environ-

- mental Pollution & Control, 2022, 44(8):1054-1067.
- [59] 王图锦.三峡库区消落带重金属迁移转化特征研究[D].重庆:重庆大学, 2011.
- Wang T J. Movement and transformation of heavy metals in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [60] Yue L, Juying J, Bingzhe T, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584(5):124694.
- [61] 周凌峰, 孟耀斌, 逯超, 等.流域尺度重金属行为模拟及其对不同气象因子的响应特征研究[J].农业环境科学学报, 2019, 38(5):1112-1120.
- Zhou L F, Meng Y B, Lu C, et al. Modeling the fate and transport of heavy metals, and their response to climate change at the watershed scale[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(5):1112-1120.
- [62] 张会茹, 郑粉莉, 耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究, 2009, 16(4):52-54.
- Zhang H R, Zheng F L, Geng X D. Effect of slope gradients on soil erosion process in red earth hillslopes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4):52-54.
- [63] Shen H, Ma R, Ye Q, et al. Impacts of corn straw coverage and slope gradient on soil erosion and sediment size distributions in the Mollisol Region, NE China[J]. Eurasian Soil Science, 2021, 54(12):2000-2008.
- [64] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟试验[J].农业工程学报, 2006, 22(2):185-187.
- Wang X, Li Z B, Li W, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2):185-187.
- [65] 徐蝶, 赵士杰, 蔡雄飞, 等.水蚀过程中土壤重金属元素的迁移特征[J].水土保持通报, 2022, 42(1):83-92.
- Xu D, Zhao S J, Cai X F, et al. Migration characteristics of heavy metals in soil during water loss process[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):83-92.
- [66] 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.
- Geng X D, Zheng F L, Liu L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes[J]. Journal of Journal of Sediment Research, 2010(6):48-53.
- [67] 张新和, 郑粉莉, 张鹏, 等.黄土坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长的侵蚀产沙作用分析[J].干旱地区农业研究, 2007, 25(6):126-131.
- Zhang X H, Zheng F L, Zhang P, et al. Contribution of upstream slope length to loessial hillslope erosion and sediment during erosion patterns evolution process[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2007, 25(6):126-131.
- [68] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J]. Catena, 2010, 81(2):97-103.
- [69] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究, 1989(4):84-91.
- Cai Q Q. The role of slope length in the process of slope erosion and sediment production[J]. Journal of Sediment Research, 1989(4):84-91.
- [70] 解明曙.林木根系固坡土力学机制研究[J].水土保持学报, 1990, 4(3):7-14.
- Jie M S. A study on the soil mechanical role of tree roots in the stability of slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(3):7-14.
- [71] 杨洋, 铁柏清, 张鹏, 等.降雨和植被覆盖对土壤重金属流失的影响[J].水土保持学报, 2011, 25(1):39-42.
- Yang Y, Tie B Q, Zhang P, et al. Effect of rainfall and vegetation coverage on runoff loss of heavy metals from soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1):39-42.
- [72] 魏慧, 赵文武, 王晶.土壤可蚀性研究述评[J].应用生态学报, 2017, 28(8):2749-2759.
- Wei H, Zhao W W, Wang J. Research progress on soil erodibility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8):2749-2759.
- [73] 吴蕾, 穆兴民, 高鹏, 等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].水土保持研究, 2019, 26(6):133-138.
- Wu L, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6):133-138.
- [74] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报, 2016, 32(14):195-201.
- Wang Q J, Zhao G X, Liu Y L, et al. Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14):195-201.
- [75] 孙希华, 张代民, 姚孝友, 等.沂蒙山区不同植被景观类型与土壤侵蚀研究[J].水土保持研究, 2008, 15(6):6-9.
- Sun X H, Zhang D M, Yao X Y, et al. Research on different vegetation landscape types and soil erosion in Yimeng Mountain Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6):6-9.
- [76] Grafe M, Nachtegaal M, Sparks D L. Formation of metal-arsenate precipitates at the goethite-water interface[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(24):6561-6570.