

微循环对村镇断头河道水土保持特性的影响

陈春伟¹, 邹轶波¹, 王磊², 徐强强³, 索鹏程³, 左晓俊^{3*}

(1. 常州市武进区水利局河道与湖泊管理处, 江苏 常州 231000; 2. 常州市武进区洛阳镇水利站, 江苏 常州 231000;
3. 南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要:以常州武进洛阳镇徐家头浜作为研究对象,调查微循环前后河道岸坡性状的变化情况,分析微循环下的河道生态系统抗冲击性能,并探讨岸坡生态系统抗冲击性能与其稳定性的关系。结果表明:①微循环过程中岸坡土壤质地、孔隙率及含水率变化均较小,但总磷(TP)、全氮(AN)、容重、抗蚀性均有较大变化;②微循环过程中河道雨后浮游生物较雨前均呈增长趋势,岸坡区域浮游生物数量明显高于河道中线区域,且微循环对河道岸坡微生物菌群抗降雨冲击具有促进作用;③岸坡土壤TP、AN及含水率对河道岸坡土壤微生物群落多样性的变化影响均达到显著水平($P < 0.05$)。研究显示,微循环能够提高河道岸坡生态系统抗冲击性能,对村镇断头河道水土保持意义重大。

关键词:太湖流域;断头河道;水系连通;微循环;水土保持

中图分类号:S157 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2021)05-0001-07

Effect of microcirculation on soil and water conservation characteristics of broken channels in villages and towns

CHEN Chunwei¹, ZOU Yibo¹, WANG Lei², XU Qiangqiang³, SUO Pengcheng³, ZUO Xiaojun^{3*}

(1. *River and Lake Management Department, Wujin District Water Conservancy Bureau, Changzhou 231000, China;*

2. *Luoyang Town Water Resources Station of Wujin District, Changzhou City, Changzhou 231000, China;*

3. *School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

Abstract: Taking Xujiatou River in Luoyang Town, Wujin District, Changzhou City as a research object, the variation of river bank slope characteristics before and after microcirculation was investigated, the impact resistance of river ecosystem under microcirculation was analyzed, and the relationship between the impact resistance and stability of river bank slope ecosystem was discussed. The results showed that: ①The changes of soil texture, porosity and water content were small in the microcirculation process, but the changes of total phosphorus (TP), total nitrogen (AN), bulk density and corrosion resistance were great. ②In the process of microcirculation, the plankton in the river after rain showed an increasing trend compared with that before rain, and the number of plankton in the

收稿日期:2020-09-23

基金项目:江苏省水利科技项目(2019032)

作者简介:陈春伟(1970—),男,工程师,研究方向为河湖水环境治理与水利工程管理。E-mail:768537073@qq.com

通信作者:左晓俊(1985—),男,教授,硕士生导师,研究方向为面源污染控制技术、水生态修复技术、水质风险与安全、现代废水处理技术。E-mail:z850108xj@163.com

bank slope area was significantly higher than that in the middle line area of the river, and microcirculation had a promoting effect on the rainfall resistance of microbial flora in the river bank slope. ③The effects of soil TP, AN and water content on soil microbial community diversity of riverbank slope were significant ($P < 0.05$). The research showed that microcirculation could improve the impact resistance of river bank slope ecosystem, which was of great significance to soil and water conservation of broken channels in villages and towns.

Key words: Taihu Basin; broken channel; water system connectivity; microcirculation; soil and water conservation

近年来,随着经济飞速发展,农村城镇化进程加快,农村地区工业企业的快速发展及人工建筑物不断增加,大量自然河道被侵占,河道被截断,水域面积萎缩,河道水系结构遭到破坏。一方面,直接造成河道水系防洪排涝能力逐渐下降^[1];另一方面,也会导致非雨期水体难以流动,破坏河道生态环境,使河道生物链系统失衡^[2]。特别在太湖流域目前与主要入湖河流相连的一级支流中的断头河道比例较高。断头河道防洪标准往往较低,雨季很可能发生因河道断面淤堵而引发的洪水灾害,威胁河道沿岸居民的人身财产安全。

水系连通性是河道水系健康的主要影响因素之一,对保持河道生态环境、创造完整稳定的河道生态系统^[3]具有重要意义。对于断头河道而言,由于房屋建筑等基础设施的客观存在,很难实现原有水系的自然连通。利用水系连通原理,通过设置微动力循环可以实现断头河道内部水流流动,达到水系连通的目的,进而修复其河道生态系统。河道生态系统与河道岸坡水土保持关系密切^[4],而河道岸坡水土保持对河道防洪意义重大。然而,当前对水系连通性的研究多集中在其对河道水质^[5]和水生态环境改善^[6]上,很少有关水系连通对河道水土保持和防洪影响方面的研究报道。

因此,本研究结合实际河道开展试验研究工作,调查微循环前后河道岸坡性状的变化情况,分析微循环下的河道生态系统抗冲击性能,探讨岸坡生态系统抗冲击性能对其稳定性的影响,研究成果为提升太湖流域农村断头河道管理水平,为农村地区断头河道水系防洪排涝提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域位置

本研究选取江苏省常州市武进区洛阳镇境内的徐家头浜作为研究对象,该支浜为太湖主要入湖河流之一武进港的一级支浜,河道长度约为1.16 km,通过排涝站与武进港相连,是太湖流域典型的村镇断头河道。研究区域如图1所示。



图1 研究区域位置

1.2 河道微循环试验方法

河道微循环设计总体为在该条支浜末端(洛阳镇阳光路戈家头村附近)设置1个小型的循环提升泵房,配置一用一备的2台提升泵,用管径200 mm的管道将河水由洛阳提升泵站西侧泵入闸站处河段,实现徐家头浜内部水体循环(图2);设计流速为0.001 m/s。于2020年5—8月每隔1周在上述设计流速条件下对目标河道进行1次持续24 h的微循环,每隔2周微循环运行前后各采样1次(记为1个采样批次,本研究过程中共进行7个采样批次)。

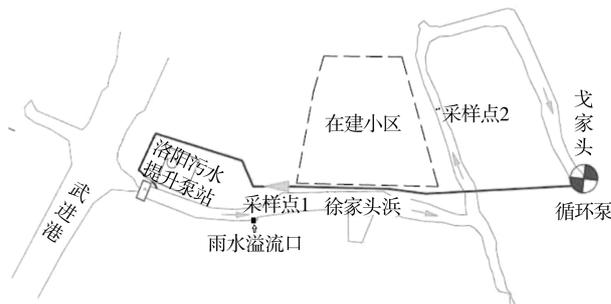


图2 河道微循环示意图

1.3 样品采集与处理

在微循环前后分别利用预先灭菌的聚乙烯塑料瓶(500 mL)采集河道沿程2处采样点(如图2中

的黑点所示)的河道岸坡和中线水样,利用沉积物采样套件采集河道岸坡土壤。每次采样完成后,按《水与废水标准监测方法》(第四版)进行处理保存,并及时送回实验室进行样品分析。按照《湖泊生态系统观测方法》要求,利用浮游生物采集网(#25号、#13号)分别对河道水体中的浮游植物和浮游动物进行采集,并用福尔马林或鲁哥试液进行固定,置于冰盒采样箱,及时送回实验室进行后续分析。采集的土壤样品分成2个部分:①部分进行土壤理化性质分析测定;②另一部分经冷冻干燥后于 -80°C 冰箱保存,用于分析微生物群落结构。

在试验开展期间,随机选取小、中、大3种不同类型降雨事件,降雨特征如表1所示,对降雨前和降雨后河道上述样品进行及时采集和处理。

表1 不同降雨事件的降雨特征

降雨采样场次	降水量/mm	平均降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	降雨历时/min
1	8.4	0.0333	252
2	17.5	0.102	172
3	31.2	0.226	138

1.4 分析方法

本研究分析测定的指标为土壤质地、理化性质、抗蚀性以及浮游生物和土壤微生物菌群结构。根据《水土保持试验规程》(SL419—2007),取冷冻干燥后的河道岸坡土样,经不同规格不锈钢筛的筛分后,用不同粒径段颗粒重量百分比来表征土壤质地;采用《氯化钾溶液提取—分光光度法》(HJ 634—2012)测定土壤全氮(AN);采用《钼锑抗比色法》(HJ 632—2011)测定土壤总磷;采用环刀法测定土壤容重,并通过土壤容重和比重计算土壤孔隙率;土壤抗蚀性用土壤团聚体的水稳性系数表示。浮游生物包括浮游动物与浮游植物,其数量的测定步骤为:将固定的水样浓缩后,吸取1 mL的浓缩液注入1 mL的计数框中,使用Nikon 50i显微镜在100倍放大倍数下进行全片镜检(至少3次重复),观察并记录数量,生物量采用标准方法计算。将冷冻干燥保存于 -80°C 的3次降雨前后的河道土壤样本进行16S rDNA测序,测河道岸坡土壤微生物菌群结构。

1.5 数据处理方法

利用Excel 2003、origin 2018等统计软件分析土壤的理化指标并进行单因素分析,采用控制变量法

研究微循环对实际河道土壤效应,运用Canoco5软件分析岸坡生态系统抗冲击性能与其稳定性的关系。

2 结果与讨论

2.1 微循环前后河道岸坡性状的变化

土壤机械组成是指土壤中各种粒级所占的重量百分比。根据土壤质地的类型和特点,参照国际分类制标准,本研究将土壤质地的粒径范围划分为粗砂($>0.25\text{ mm}$)、细砂($0.05 \sim 0.25\text{ mm}$)和粉粒($<0.01\text{ mm}$)。相关研究表明,不同直径的颗粒其土壤特性差别很大:砂粒的持水性最差,无可塑性,常规干燥状态下呈单粒松散状态;粉粒的可塑性与持水性较差,且不易膨胀^[7]。图3为微循环前后土壤质地变化情况。

由图3可见,采样点1和点2的河道岸坡土壤颗粒组成占比基本一致,岸坡土壤颗粒占比最大均为粗砂($>0.25\text{ mm}$)和细砂($0.05 \sim 0.25\text{ mm}$),平均为74.3%~80.4%和15.2%~17.9%,粉粒($<0.05\text{ mm}$)所占比例较小(4%),这与何淑勤等^[8]对不同植被条件下土壤质地分布的研究相似;同时,2个采样点的岸坡土壤中3种颗粒组成在微循环过程中变化基本一致。由图3(a)可知,采样点1在第一批采样微循环前后,边坡土壤粗砂($>0.25\text{ mm}$)占比降低约11.7%,细砂比例增加,粉粒占比基本不变。并且在第二到第五批次采样微循环过程中细砂比例不断增大,由6.8%增至20%,而第五到第六批次采样微循环过程中,河道岸坡土壤结构趋于稳定,3种颗粒占比波动不大。对比2个采样点在微循环前后土壤结构变化可以得出,采样点2在微循环前后期土壤结构与采样点1变化趋势相同。

土壤理化性质是影响岸坡稳定性能的重要参数^[9]。由图4(a)可以看出,2个采样点土壤总磷质量比大小及变化趋势基本一致,在前2个批次采样微循环过程中,岸坡土壤总磷质量比呈下降趋势较大,由0.8 mg/g降至0.12 mg/g,变化率为0.15,随着微循环次数增加,岸坡土壤总磷质量比趋于稳定,在0.05 mg/g,表明初期微循环土壤总磷冲溶现象较为明显,后期微循环对岸坡土壤总磷影响较稳定。

土壤含水率是土壤持水性能的重要体现指标。由图4(b)可见,河岸土壤自然含水率较高,2个采样点平均含水率分别为30%(采样点1)和27.8%(采样点2),表现为湿润多水的特征^[7]。2个采样点之间含水率差异并不明显,岸坡土壤持水稳定性

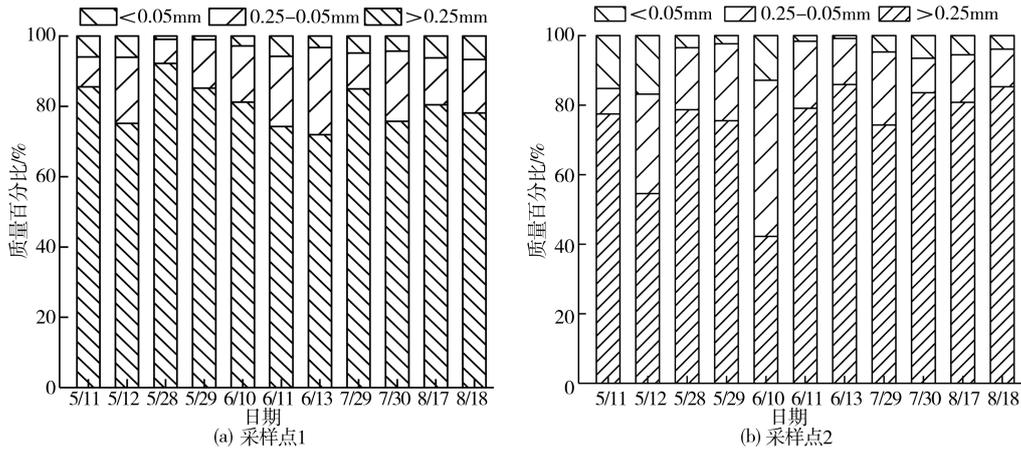


图3 微循环前后土壤质地变化情况

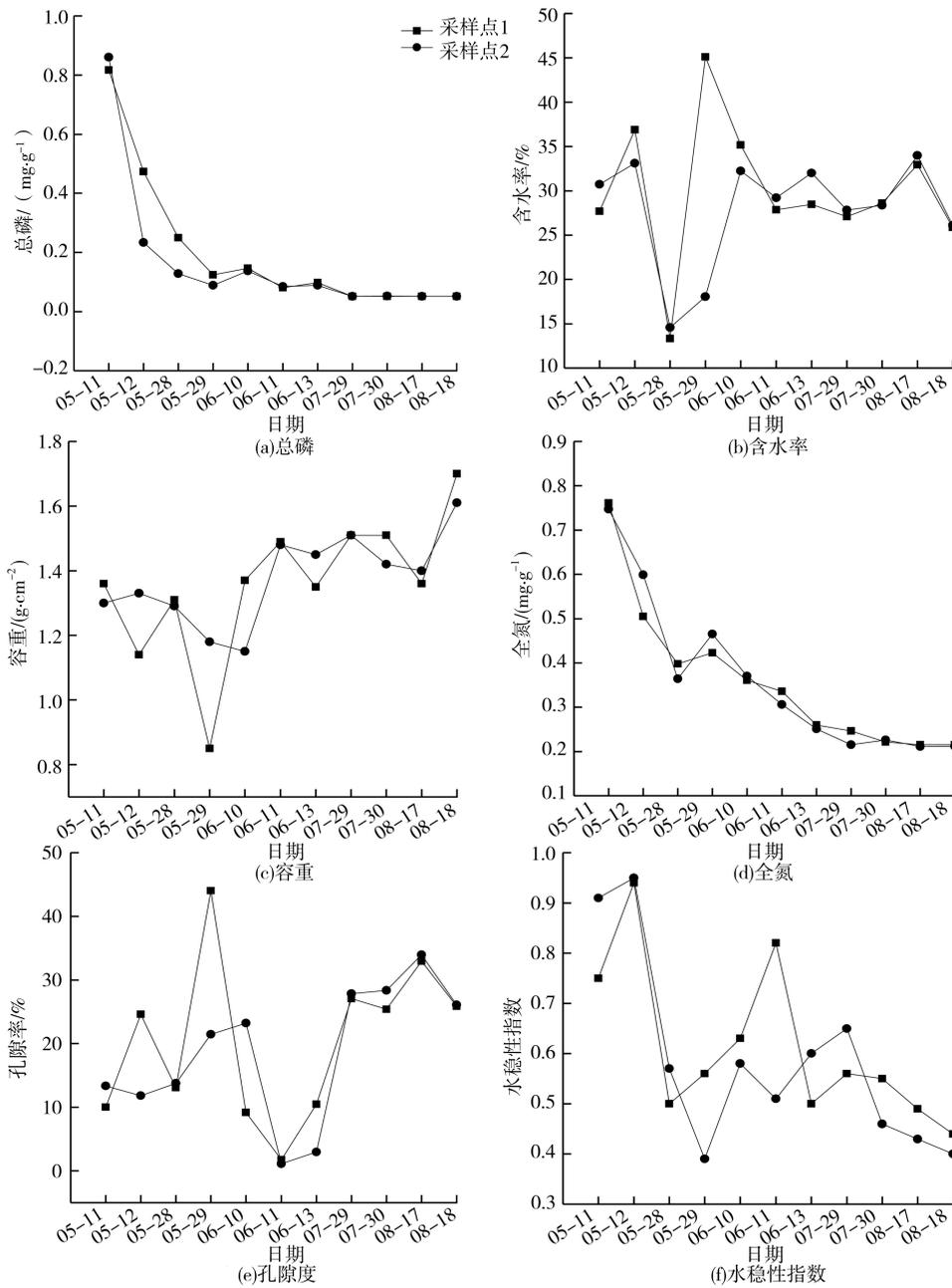


图4 微循环前后土样理化性质及水稳定性变化情况

能较为稳定。

土壤容重是衡量土壤肥力的重要指标之一,土壤容重越小,土壤越松散,反之,土壤容重越大,土壤越紧实^[10]。由图4(c)可以看出,在6批采样微循环过程中,2个采样点河道岸坡土壤的土壤容重在 $1.1 \sim 1.49 \text{ g/cm}^3$ 之间变化;且随微循环次数增加,河道岸坡土壤容重整体呈上升趋势;表明微循环有利于形成土壤紧实的河道岸坡,增加河道岸坡的稳定性。

如图4(d)所示,微循环过程中岸坡土壤AN变化与TP变化相似,2个采样点土壤AN质量比均在前2个批次采样微循环过程中下降较快,在后4个批次采样微循环过程中土壤TN质量比趋于稳定,质量比由 0.761 mg/g 下降到 0.215 mg/g 。孔隙度表示土壤空隙的分布情况。从图4(e)可见,在整个微循环过程中,岸坡土壤孔隙度大小呈波动上升趋势,岸坡孔隙度的大小平均为20%。在前3个批次采样微循环过程中,河道岸坡孔隙度逐渐增大,在3~5个批次采样微循环过程中孔隙度有所下降,微循环后期孔隙度又持续增加,循环初期到后期,岸坡土壤孔隙度从10%增至25%。

水稳性指数是通过测定土壤团聚体在静水中的分散速度来比较土壤抗蚀性能的大小^[11]。从图4(f)可见,在前2个批次采样微循环过程中,岸坡土壤水稳性指数较高($0.7 \sim 0.9$),随着循环次数增加,水稳性指数不断减小,从 0.9 (初期)降至 0.4 (后期),表明岸坡土壤的抗蚀性能逐渐降低。

2.2 微循环下的河道生态系统抗冲击性能

由图5可知,3次降雨事件雨前及雨后浮游动物、植物数量均在 $10^2 \sim 10^3$ 个/mL范围内。其中小雨事件(5月28日)中,采样点1岸坡及中线雨前雨

后浮游植物变化趋势与浮游动物的相同,雨后较雨前的均表现出增加趋势,而采样点2岸坡及中线雨前雨后浮游植物和浮游动物的变化趋势相反。中雨事件(6月10日)中,各采样点雨后浮游动物、植物的数量均比雨前低。大雨事件(6月13日)中,各采样点雨前雨后浮游动物、植物的变化趋势却和中雨事件完全相反,各采样点雨后浮游动物、植物较雨前的均呈现增长趋势。综合各采样点河道岸坡及中线的浮游动物、植物的数量发现,降雨前后河道岸坡的浮游动物、植物数明显比河道中线区域的多。

OTU和Chao1指数可以表示微生物群落的物种丰富度;微生物群落多样性水平(均匀度)用Shannon与Simpson指数表示,Shannon和Simpson指数越高代表物种多样性水平越高^[12]。3次降雨事件各采样点河道岸坡降雨前后 α 多样性指数如表2所示,在小雨和中雨事件中,各采样点岸坡雨前OUT数量、Chao1、Shannon与Simpson指数均比雨后的低,表明降雨前河道岸坡物种丰富度及微生物多样性水平明显比降雨后的低。在大雨事件中,各采样点岸坡降雨前后的OUT数量、Chao1、Shannon与Simpson指数变化规律与前2种类型降雨事件的相反,且降雨前河道岸坡上述4个指标均高于降雨后的。

由图6可知,小雨事件中,河道岸坡微生物优势菌群由降雨前的24种变成降雨后的19种,优势菌群下降幅度为20.8%,其中相对丰度占比较大的为Sphingomonas和Arthrobacter。中雨事件中,河道岸坡微生物优势菌群由降雨前的22种变成降雨后的21种,优势菌群下降幅度为4.5%,其中Sphingomonas、Arenimonas和Massilia是相对丰度较大的优势菌群,且Massilia受降雨影响最明显。大雨事

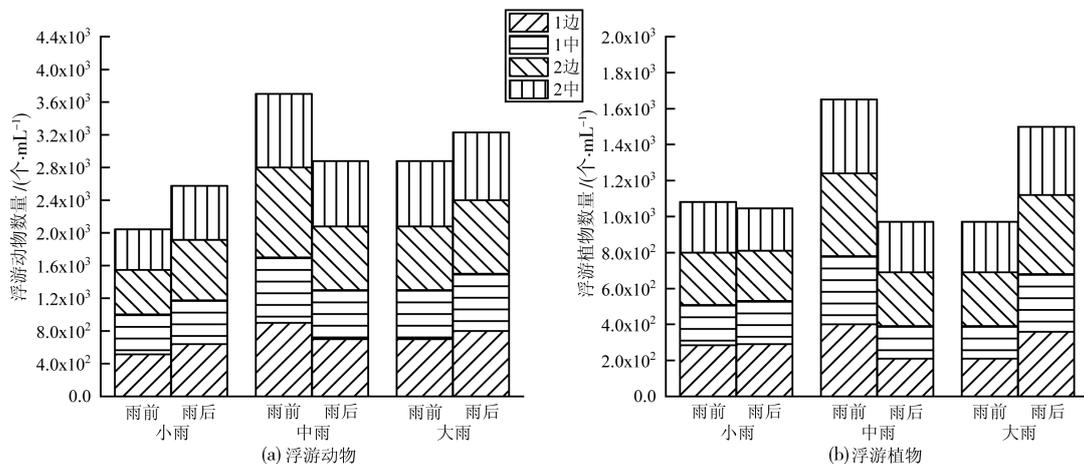


图5 降雨前后浮游生物变化情况

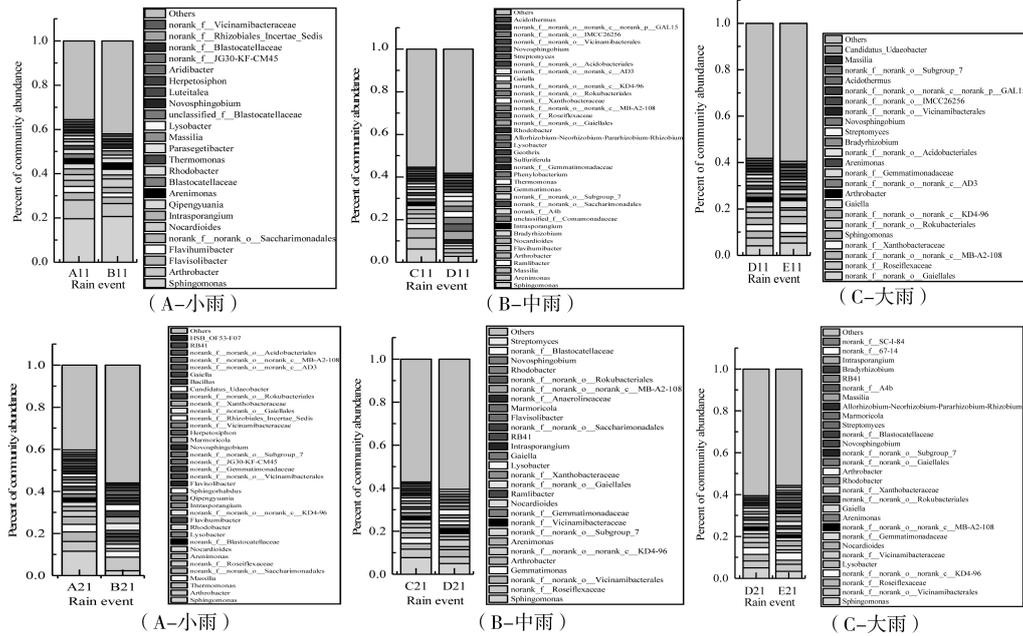


图6 降雨前后河道岸坡土壤微生物菌群结构变化情况

表2 微生物多样性指数

采样点	OTUs	Chao1	Shannon	Simpson
A11	1976	2915.4	5.01	0.969
B11	2015	2922.8	5.11	0.970
C11	2232	3155.7	5.94	0.991
D11	3357	4486.6	6.72	0.996
E11	3223	4394.7	6.66	0.996
A21	2480	3457.2	5.71	0.985
B21	3745	5106.2	6.68	0.993
C21	3326	4449.2	6.67	0.995
D21	3934	5049.0	6.84	0.996
E21	3809	4807.9	6.79	0.996

注:A、B、C、D、E 分别表示 3 场降雨前后采样事件;数字表示采样点。

件中,河道岸坡微生物优势菌群由降雨前的 21 种变成降雨后的 23 种,优势菌群上升幅度为 9.5%,其中 *Sphingomonas*、*norank_f__norank_o__Vicinamibacterales*、*norank_f__Roseiflexaceae* 和 *norank_f__norank_o__norank_c__KD4-96* 等优势菌群占比较高。可见,小雨和中雨类型的降雨事件中,降雨后优势菌群减少,且小雨事件中优势菌群变化率较大,中雨事件下变化不明显,而大雨类型下,降雨后优势菌群增加,变化程度高于中雨类型低于小雨类

型。在本研究中,随着上述 3 种类型降雨事件的依次发生,河道微循环运行次数也在逐渐增加,结合这 3 种不同类型降雨事件中河道岸坡优势菌群变化幅度,反映出河道微循环对河道岸坡生态系统抗冲击性能具有促进作用。

2.3 岸坡生态系统抗冲击性能与其稳定性的关系

岸坡土壤微生物的多样性变化一定程度代表了岸坡生态系统抗冲击性能^[13]。本研究中,将岸坡土壤属类水平下微生物群落与上述土壤质地、理化性质、抗蚀性等环境因子作冗余分析,以探讨岸坡生态系统抗冲击性能与其稳定性的关系。3 场降雨前后微循环过程中岸坡土壤微生物多样性与其理化性质的 RDA 分析,如图 7 所示。2 个采样点降雨及微循环岸坡土壤微生物样本分散于 4 个象限中,表明随降雨及微循环场次不同,岸坡土壤微生物群落多样性变化较大。同时,降雨及微循环前后影响岸坡土壤微生物群落多样性变化的指标略有差异。与降雨前 2 个采样点岸坡土壤微生物多样性相关的环境因子有营养元素(TP, AN)、含水率、抗蚀性及 0.05~0.25 mm 粒径段土壤颗粒分布,而降雨及微循环后与其相关的环境因子增加了小于 0.05 mm 粒径段土壤颗粒分布,但仅减少了抗蚀性,表明岸坡生态系统抗冲击性能变化与其土壤稳定性关系密切。

另由图 7 可见,影响岸坡土壤微生物群落的第一排序轴和第二排序特征值分别为降雨前(72.74%、14.32%)和降雨后(78.62%、10.54%),

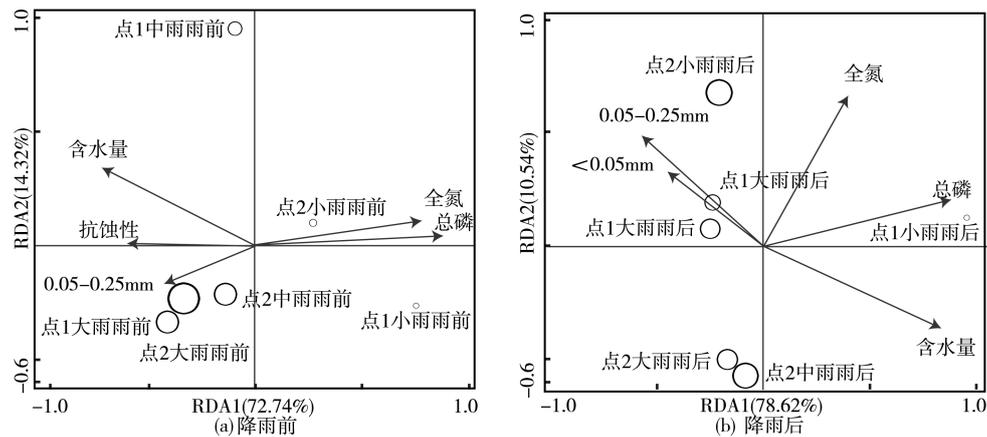


图7 岸坡土壤微生物与环境因子的 RDA 分析

分别可以解释岸坡土壤微生物群落多样性变化总方差值的 87.06%、89.16%。冗余分析表明,降雨及微循环前后,岸坡土壤 TP、AN 及含水率对河道岸坡土壤微生物群落多样性的变化影响均达到显著水平($P < 0.05$),对岸坡土壤微生物群落变化的解释度分别为 64.2% (TP)、11.35% (AN)、13.45% (含水率);然而,降雨及微循环前抗蚀性与 0.05 ~ 0.25 mm 粒径段土壤颗粒分布对河道岸坡土壤微生物群落多样性的变化影响无显著的相关性,对岸坡土壤微生物群落变化的解释度均较小(4.5%、6.7%);同样,降雨及微循环后增加的环境因子(<0.05 mm 粒径段土壤颗粒分布)对微生物群落多样性变化也无显著相关性。整体来看,在降雨及微循环运行过程中,岸坡生态系统抗冲击性受其土壤 TP、AN 及含水率等环境因子稳定性的影响较大。

3 结论

(1)微循环过程中岸坡土壤质地、孔隙率及含水率变化均较小,土壤总磷(TP)、全氮(AN)含量随微循环次数增加先降低后趋于稳定,容重整体呈上升趋势,而抗蚀性不断减小。

(2)微循环过程中,各采样点雨后浮游生物较雨前均呈增长趋势,岸坡区域浮游生物数量明显高于河道中线区域,且微循环对河道岸坡微生物菌群抗降雨冲击具有促进作用。

(3)岸坡土壤 TP、AN 及含水率对河道岸坡土壤微生物群落多样性的变化影响均达到显著水平($P < 0.05$),对岸坡土壤微生物群落变化的解释度分别为 64.2% (TP)、11.35% (AN)、13.45% (含水率),岸坡生态系统抗冲击性受其土壤 TP、AN 及含水率等环境因子稳定性的影响较大。

参考文献:

- [1] 周峰,吕慧华,许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3):402-409.
- [2] 陆志华,蔡梅,马农乐,等. 武澄锡虞区河湖水系连通与水安全保障研究的思考[J]. 人民长江, 2020, 51(8):118-122.
- [3] 张欧阳,卜惠峰,王翠平,等. 长江流域水系连通性对河流健康的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(2):1-5.
- [4] 潘尧燕. 河道生态工程建设中的水土保持[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(4):185-187.
- [5] 周震. 巢湖流域水系连通性及其对水质的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- [6] 崔广柏,陈星,向龙,等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12):1429-1437.
- [7] 孟凡超. 城市河道退化河岸生态修复技术的水土保持效应及其稳定性评价[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [8] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等. 不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):17-22.
- [9] 侯春媛,李玲. 温昌焘. 土壤抗冲性研究方法及其影响因素综述[J]. 现代农业科技, 2017(2):230-232, 234.
- [10] 李存焕,史秀华. 草坪土壤学[M]. 北京:中国戏剧出版社, 2006:82.
- [11] 李程程,曾全超,贾培龙,等. 黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀能力经度变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40(6):2039-2048.
- [12] YU Z, YANG J, LIU L. Bacterioplankton community shifts associated with epipelagic and mesopelagic waters in the Southern Ocean [J]. Scientific Reports, 2015(5):1-10.
- [13] WANG Y. Long-term no-tillage and organic input management enhanced the diversity and stability of soil microbial community [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609:341-347.