

黄河宁夏段泥沙和灌淤土团聚体速效氮磷分布特征

赵 营^{1, 2}, 刘晓彤^{1, 2}, 冒辛平^{1, 2}, 罗健航¹, 柯 英¹, 张学军¹

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002;

2. 国家农业环境银川观测实验站, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 为明确黄河上游宁夏段泥沙输入对农田灌淤土团聚体和土壤培肥的影响特征, 在干流动态采集了 5 月 (春灌)、8 月 (夏灌)、10 月 (冬灌) 的沉积泥沙, 以灌淤土为对照, 测定了其机械稳定性团聚体及其 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、有效磷含量。结果表明, 黄河宁夏段泥沙中 <0.25 mm 团聚体占 70.8% ~ 87.5%; >0.25 mm 团聚体数量、平均重量直径和几何平均直径均为 8 月 >10 月 >5 月, 泥沙团聚体稳定性显著低于灌淤土。泥沙团聚体无机氮以 NO_3^- -N 为主, 占 78.9% ~ 99.3%。泥沙 1 ~ 2 或 0.5 ~ 1 mm 团聚体有效磷含量较高。5、8 月泥沙和灌淤土各粒径团聚体无机氮含量呈正相关, 而在 10 月呈负相关。不同灌溉时期泥沙和灌淤土各粒径团聚体有效磷含量均呈负相关。因此, 黄河宁夏段灌溉泥沙 <0.25 mm 微团聚体对灌淤土团粒结构影响较大, 春灌时期不同粒径团聚体泥沙速效氮磷含量最高。

关键词: 黄河宁夏段; 泥沙; 机械稳定性团聚体; 无机氮; 有效磷

黄河泥沙主要来源于黄土高原第四纪沉积物, 其占全河沙量达 90% 以上^[1], 导致流域水体中泥沙的粒度、矿物和化学组成等与流域内黄土的相似性极高, 且各断面的泥沙在物理化学性质上也有相当程度的均一性^[2]。很多研究证实, 黄河泥沙减少与人类活动和降水变化密切相关^[3-5]。当泥沙颗粒中粘土颗粒含量多时, 泥沙的中值粒径就偏小, 反之亦然^[1]; 泥沙的中值粒径越小, 泥沙粒径越细, 随着含沙量的增加, 粒径对粘滞性的影响越大^[6]。黄河表层沉积物的平均粒径在我国东部河流中是最大的, 但悬浮物的平均粒径比表层沉积物要细^[7]。毛伟兵等^[8]研究认为, 引黄泥沙和输沙入田后耕层土壤颗粒组成、容重、孔隙状况等物理性状都有较大变化, 在一定程度上增加了土壤通气孔隙比例、降低了土壤容重。在黄河下游灌区, 掺黄河泥沙或配施生物有机肥能够提高小麦光合性能, 提高源生产能力, 促进源库转化, 有利于滨海盐碱土壤的改良和可持续开发利用^[9]。引黄淤灌是宁

夏灌区农田典型的灌溉方式, 20 世纪 80 年代, 小麦地每年灌溉落淤量为 $10.3 \sim 14.1 \text{ t/hm}^2$, 水稻田高达 155.4 t/hm^2 , 由此形成了灌淤土这种典型土壤类型^[10]。

国内外在水体沉积物中氮磷的赋存形态和分级方法方面取得了大量的研究成果^[11-12]。国内对黄河内蒙古段 6 个表层沉积物样品中离子交换态氮、碳酸盐结合态氮、铁锰氧化态氮和有机态与硫化物结合态氮等形态氮含量进行测定发现, 沉积物各形态氮之间存在显著相关关系, 且其含量都存在明显的秋高夏低的季节性变化特征^[13]。黄河泥沙含量越高, 泥沙粒径越小, 水体中氨氮降解速率越大^[14]。国内学者在黄河泥沙沉积物中磷形态、生物有效性分析研究上作了大量工作^[15-16], 发现溶解相磷浓度与含沙量间存在较好的线性关系^[17]。

综上所述, 黄河泥沙减少的影响因素、泥沙改善土壤物理特性和水体沉积物氮磷赋存形态等已进行大量深入研究, 但在黄河上游宁夏段泥沙团聚体粒径分布及不同粒径团聚体速效氮磷含量方面的研究尚少见报道。因此, 本文以农田灌淤土为对照, 利用 2016 年 5—10 月在黄河上游宁夏段干流定位采集的沉积泥沙样品, 分别分析测定了颗粒组成、机械稳定性团聚体及其速效氮磷含量, 探讨了泥沙和灌淤土团聚体分布特征及团聚体速效氮磷含量的关系, 为黄河上游宁夏段引黄淤灌下泥沙输

收稿日期: 2022-03-16; 录用日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目 (U20A20114); 宁夏自然科学基金项目 (2020AAC03304); 国家自然科学基金项目 (41401319)。

作者简介: 赵营 (1979-), 副研究员, 博士, 主要从事农田养分循环与高效利用研究。E-mail: tony029@126.com。

人对农田灌淤土团粒结构形成和土壤培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河上游宁夏段介于下河沿至石嘴山水文站之间, 全长为 397 km, 区段所辖宁夏灌区总土地面积 $3.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占宁夏全区面积的 41%。以青铜峡水利枢纽为界, 将宁夏灌区分割为卫宁灌区和青铜峡灌区。该区段 2016 年总降水量为 203.4 mm, 且降水年内分配不均, 当年 6—9 月降水占全年的 64.3%, 2016 年黄河宁夏段降水量月度分布见图 1。

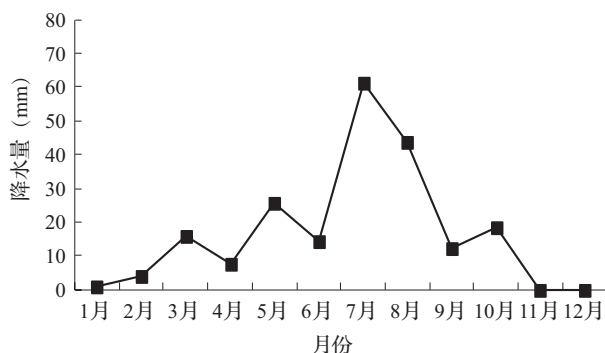


图1 2016年黄河宁夏段降水量月度分布

注: 降水量数据来源 2016 年宁夏水资源公报。

1.2 试验方法

2016 年 5 月 (春灌)、8 月 (夏灌)、10 月 (冬灌), 分别在黄河宁夏段上游的中宁县田滩村铁路黄河大桥 ($105^{\circ} 35' 31.28'' \text{ E}$, $37^{\circ} 30' 16.61'' \text{ N}$)、中游的青铜峡市大坝水电站 ($106^{\circ} 00' 40.05'' \text{ E}$, $37^{\circ} 54' 01.48'' \text{ N}$)、下游的平罗县四排口 ($106^{\circ} 35' 34.36'' \text{ E}$, $38^{\circ} 44' 21.73'' \text{ N}$) 设 3 个定位监测点, 采集黄河干流沉积泥沙样品备测, 每次采样时沿黄河边, 各个监测点采集 5 个重复样混合成 1 个样品, 用不锈钢铲子取样, 采样深度为 10 cm 左右。于 5 月采集 0 ~ 20 cm 灌淤土作对照, 黄河宁夏段上、中、下游各选 1 个稻田采集多点混合样 ($n=5$), 前茬作物均为水稻, 5 月上旬施基肥整地, 5 月中旬插秧, 生育期间追肥 2 次, 9 月下旬收获。黄河宁夏段泥沙 pH 8.44, 有机质 2.09 g/kg, 全氮 0.17 g/kg, 全磷 0.53 g/kg, 有效磷 4.6 mg/kg; 耕层灌淤土平均 pH 8.21, 有机质 16.36 g/kg, 全氮 1.08 g/kg, 全磷 0.86 g/kg, 有效磷 34.0 mg/kg。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 机械稳定性团聚体

机械稳定性团聚体根据沙维诺夫法测定。称取过 8 mm 筛 200 g 风干土和泥沙放于筛组最上层, 按 2、1、0.5、0.25 mm 进行筛分振荡 5 min, 频率每分钟 60 次, 振幅 40 cm 左右, 然后小心收集各筛上的泥沙或土样, 分别称重计算各粒级泥沙或土样机械稳定性团聚体的含量^[18]。

1.3.2 速效氮磷含量测定

各分级泥沙和土样采用 1 mol/L KCl 溶液振荡浸提 30 min, 利用德国 DeChem-Tech. GmbH 公司的全自动间断分析仪 Cleverchem 200 测定土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量, 检测吸光度范围 0 ~ 3.5 Abs, 灵敏度 0.0001 Abs, 无机氮 $= \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。采用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗分光光度法测定有效磷, 取样量为 2.50 g, 50 mL 碳酸氢钠溶液浸提, 10 mm 比色皿时, 检出限为 0.5 mg/kg。

1.4 计算公式及数据统计

团聚体稳定性的评价指标采用 $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体数量 ($R_{0.25}$)、平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)^[18-19], 具体计算公式分别如下:

$$R_{0.25} = M_{R>0.25} / M_T \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \sum (M_i / M_T) X_i \quad (2)$$

$$\text{GMD} = \exp \{ \sum (M_i / M_T) \ln X_i \} \quad (3)$$

式中: $M_{R>0.25}$ 表示粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体质量; M_T 表示团聚体总重; M_i 表示第 i 个粒径团聚体质量; X_i 表示第 i 个粒径团聚体平均直径。

数据和图表处理采用 Excel 2010, 统计分析采用 DPS 18.10, 多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 黄河宁夏段泥沙机械稳定性团聚体粒径分布

由表 1 可知, 黄河宁夏段 5、8、10 月泥沙机械稳定性团聚体数量主要分布在 $<0.25 \text{ mm}$, 所占比例分别为 87.5%、70.8%、78.2%, 表现为 5 月 $>10 \text{ mm}$ $>8 \text{ mm}$ 。灌淤土机械稳定性团聚体粒径也以 $<0.25 \text{ mm}$ 为主, 占 32.9%, $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 2$ 、 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径团聚体分别占 20.1%、19.1%、17.3%, $>2 \text{ mm}$ 团聚体仅 10.5%。不同灌溉时期泥沙中 $<0.25 \text{ mm}$ 微团聚体明显高于灌淤土, 而灌淤土 $>0.25 \text{ mm}$ 大团聚体含量都显著高于不同灌溉时期泥沙。随着 8 月前后降水量增多 (图 1), 泥沙中 $>0.25 \text{ mm}$

大团聚体含量明显增加,尤其是1~2 mm 粒径颗粒明显高于5和10月。不同灌溉时期泥沙团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD分别在12.5%~29.2%、0.21~0.35 mm和0.16~0.21 mm之间,都表现为8月>10月>5月,灌淤土团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD、

GMD分别是泥沙的2.3~5.4、3.0~5.1、2.4~3.3倍。由此可见,黄河宁夏段泥沙团聚体粒径分布及稳定性具有较大的时间变异性,且其稳定性显著低于灌淤土,引黄灌溉泥沙对农田灌淤土<0.25 mm微团聚体的贡献较大。

表 1 黄河宁夏段泥沙与灌淤土机械稳定性团聚体粒径分布

类型	团聚体粒径分布 (%)					团聚体稳定性		
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm	$R_{0.25}$ (%)	平均重量直径 (mm)	几何平均直径 (mm)
灌淤土	10.5 ± 3.3	19.1 ± 1.4a	20.1 ± 1.9a	17.3 ± 1.5a	32.9 ± 1.8c	67.1 ± 1.6a	1.07 ± 0.13a	0.51 ± 0.03a
5月泥沙	—	2.4 ± 1.1c	6.6 ± 2.5c	3.5 ± 0.8c	87.5 ± 3.8a	12.5 ± 4.2c	0.21 ± 0.03b	0.16 ± 0.01c
8月泥沙	—	10.1 ± 3.0b	10.5 ± 3.3b	8.6 ± 4.0b	70.8 ± 22.3b	29.2 ± 7.3b	0.35 ± 0.06b	0.21 ± 0.03b
10月泥沙	—	3.9 ± 2.3c	7.5 ± 3.9bc	10.5 ± 6.1b	78.2 ± 8.8ab	21.8 ± 9.8bc	0.25 ± 0.06b	0.18 ± 0.03bc

注: $R_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体数量。数据为平均值 ± 标准差,同一列不同小写字母表示 5% 水平差异显著。

2.2 黄河宁夏段泥沙不同粒径团聚体中无机氮和有效磷含量

表2为黄河宁夏段泥沙和灌淤土不同粒径团聚体无机氮(NO_3^- -N和 NH_4^+ -N)和有效磷含量,结果表明,5、8和10月黄河泥沙不同粒径团聚体 NO_3^- -N含量分别为8.77~13.69、3.11~3.46和4.07~4.69 mg/kg,整体表现为5月>10月>8月;灌淤土不同粒径团聚体中 NO_3^- -N含量在10.00~13.36 mg/kg之间。5月黄河泥沙不同粒径团聚体 NO_3^- -N含量都显著高于8和10月,

但与灌淤土同级颗粒之间的差异不明显。5、8和10月黄河泥沙不同粒径团聚体 NH_4^+ -N含量分别为0.10~0.36、0.51~0.83和0.38~0.82 mg/kg,最高含量都在1~2 mm团聚体,整体表现为8月>10月>5月,但3个时期的差异不显著;灌淤土不同粒径团聚体 NH_4^+ -N含量在0.48~2.22 mg/kg之间,最高含量为0.5~1 mm团聚体。因此,黄河宁夏段泥沙团聚体无机氮以 NO_3^- -N为主,占78.9%~99.3%,且动态差异性较大,5月引黄灌溉泥沙不同粒径团聚体均输入较高的 NO_3^- -N;但

表 2 黄河宁夏段泥沙和灌淤土团聚体中无机氮和有效磷含量 (mg/kg)

类型	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	<0.25 mm
NO_3^- -N					
灌淤土	11.73 ± 0.22	10.00 ± 0.50a	13.36 ± 2.37a	10.94 ± 0.56a	12.86 ± 0.46a
5月泥沙	—	9.49 ± 2.02a	10.39 ± 2.11a	8.77 ± 1.29b	13.69 ± 6.79a
8月泥沙	—	3.11 ± 1.79b	3.46 ± 1.84b	3.36 ± 1.33c	3.37 ± 0.49b
10月泥沙	—	4.54 ± 1.96b	4.07 ± 1.37b	4.69 ± 0.32c	4.16 ± 0.33b
NH_4^+ -N					
灌淤土	0.78 ± 0.61	0.48 ± 0.37a	2.22 ± 1.56a	1.24 ± 0.96a	2.13 ± 0.43a
5月泥沙	—	0.36 ± 0.32a	0.10 ± 0.05b	0.17 ± 0.12b	0.10 ± 0.02b
8月泥沙	—	0.83 ± 0.35a	0.73 ± 0.23ab	0.57 ± 0.40ab	0.51 ± 0.40b
10月泥沙	—	0.82 ± 0.53a	0.69 ± 0.36ab	0.38 ± 0.34ab	0.48 ± 0.11b
有效磷					
灌淤土	54.80 ± 8.66	54.00 ± 9.88a	47.63 ± 13.93a	52.27 ± 1.42a	55.53 ± 5.60a
5月泥沙	—	16.72 ± 12.48b	12.58 ± 3.77b	10.61 ± 3.20b	8.30 ± 4.58b
8月泥沙	—	6.37 ± 1.39b	6.64 ± 1.60b	5.29 ± 2.42c	5.33 ± 1.78b
10月泥沙	—	6.25 ± 0.90b	5.43 ± 0.65b	3.95 ± 1.83c	4.18 ± 1.48b

注: 数据为平均值 ± 标准差,同一项目同一列数据后不同小写字母表示 5% 水平差异显著。

不同灌溉时期泥沙颗粒中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量差异不明显。

由表2还可看出, 5、8和10月黄河泥沙不同粒径团聚体有效磷含量分别在 8.30 ~ 16.72、5.29 ~ 6.64 和 3.95 ~ 6.25 mg/kg 之间, 最高含量出现在 1 ~ 2 或 0.5 ~ 1 mm 团聚体中, 整体表现为 5月 > 8月 > 10月, 除 0.25 ~ 0.5 mm 团聚体外, 3个时期的差异均不显著。灌淤土不同粒径团聚体有效磷含量在 47.63 ~ 55.53 mg/kg 之间, 0.5 ~ 1 mm 粒径下含量最低。综合分析看, 黄河泥沙不同粒径团聚体有效磷含量都显著低于灌淤土同粒径团聚体, 5月春灌季泥沙不同粒径团聚体有效磷含量最高。

2.3 黄河宁夏段泥沙和灌淤土团聚体无机氮、有效磷含量相关性

拟合了黄河宁夏段泥沙和灌淤土不同粒径团

聚体无机氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和有效磷含量相关关系, 如图 2a、b 所示, 均未达显著水平。由图 2a 可知, 5、8月黄河泥沙和灌淤土各粒径团聚体无机氮含量呈正相关, R^2 分别为 0.3598 和 0.4608, 而在 10月二者呈负相关, $R^2=0.9310$ 。由此可见, 不同灌溉时期黄河泥沙团聚体无机氮对同粒径灌淤土的贡献呈动态变化, 在 5月春灌和 8月夏灌时期, 二者是正协同效应, 在 10月冬灌时期, 二者是负效应。图 2b 可发现, 5、8、10月黄河泥沙和灌淤土各粒径团聚体有效磷含量均呈负相关, R^2 分别为 0.9756、0.3885 和 0.2924, 且随着春灌 - 夏灌 - 冬灌季进行, 二者的相关性不断降低。因此, 黄河宁夏段不同灌溉时期泥沙大团聚体输入灌淤土农田的有效磷量较高, 5月春灌时期负效应更明显。

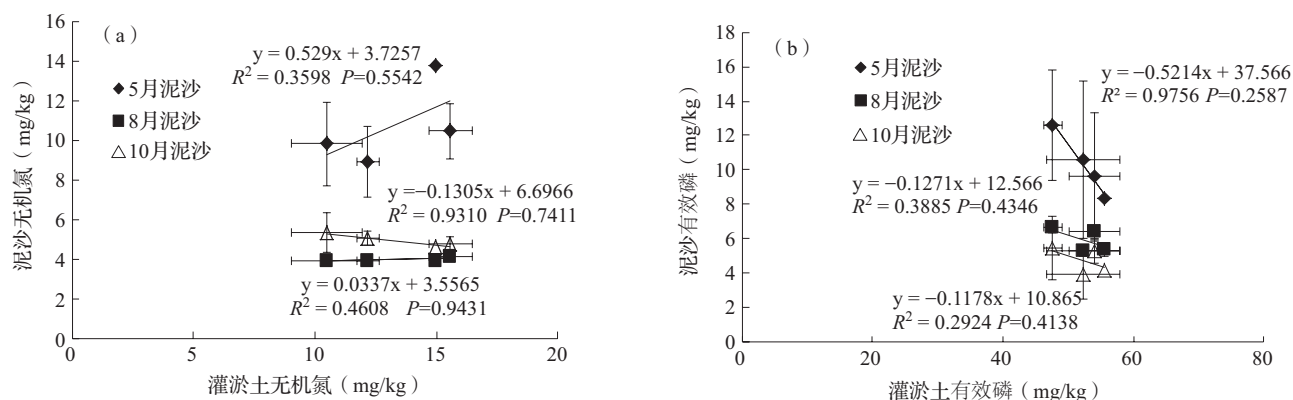


图2 黄河宁夏段泥沙和灌淤土团聚体无机氮 (a)、有效磷 (b) 含量相关性

注: 图中每个点为 3 个重复平均值。

3 讨论

团聚体的分布和稳定性状况是反映土壤结构和肥力供应的重要指标, 并受土壤有机质、土壤微生物、耕作措施等影响^[18-21]。黄河具有“水沙异源”的空间分异特征, 径流主要来自上游地区、泥沙主要来自中游地区, 黄河宁夏段清水河支流由水土流失每年输入黄河的泥沙约占宁夏入黄总沙量的 49%^[5]。侵蚀泥沙通常由单粒和团聚体组成, 绝大多数是以团聚体形式被侵蚀输移的^[22-23]。有研究发现, 进入黄河河道的泥沙以悬移质为主, 淤积在河道中的沉积物主要是粒径大于 0.025 mm 的泥沙^[2], 黄河宁蒙段河床泥沙沉积物平均粒径主要分布在 0.020 ~ 0.060 mm (51.8%) 和 0.08 ~ 0.25 mm

(41.7%) 粒级区间^[24], 本研究中泥沙以 <0.25 mm 微团聚体为主, 而更小颗粒级配比例尚需深入探讨。 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 值越大均表明团聚体各个粒径团聚度越强, 稳定性越高^[18-19]。本试验条件下, 不同灌溉时期黄河泥沙团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均显著低于灌淤土, 表明黄河泥沙的团聚体稳定性较差, 在水分的消散和分散作用下, 泥沙中团聚体通过“水爆”机制破碎明显^[21]。由此可见, 引黄灌溉泥沙 <0.25 mm 微团聚体输入农田对灌淤土团粒结构稳定性并不具有积极意义, 而农田深松耕能显著提高土壤团聚体含量和稳定性, 而且深松深度越深对土壤结构的改良效果越好^[25]。同时, 通过增施有机肥或添加有机物料会增加土壤大团聚体比例和土壤团聚体 MWD, 增强土壤团聚体

稳定性^[26-27]。因此,引黄灌溉下农田施肥和耕作对灌淤土土壤结构改善和大团聚体形成显得尤为重要。

很多研究证实,沉积物-水界面的氮磷可以通过各种物理、化学、生物作用参与到沉积物-水体交换中^[28],黄河水体-泥沙界面中氮磷也发生类似的转化交换过程。在黄河宁夏段,溶解性总氮和颗粒态总磷分别为黄河水体(含泥沙)主要氮磷赋存形态^[29],泥沙颗粒磷含量比例较高。在川西低山丘陵区茶园土壤, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 储量均在>2 mm 粒径团聚体最高^[30],本研究中黄河泥沙团聚体硝态氮富集动态变化较大,而泥沙 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要分布在1~2 mm 团聚体中。在西辽河不同粒级沉积物中,黏粒级和粉粒级沉积物吸附的磷是磷素循环的重要组成部分^[31],而本研究黄河泥沙有效磷主要分布在1~2或0.5~1 mm 团聚体中。这表明,黄河宁夏段泥沙大粒径团聚体对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和有效磷的吸附固定作用明显。

黄河下游河南郑州段天然河漫滩土壤粉粒和黏粒含量分别与土壤有机碳、全氮、全磷含量显著相关^[32];三峡水库消落带在不同土地利用下,土壤有机碳与全磷对团聚体的稳定具有显著的正面影响,全氮通过促进土壤有机碳的形成而间接促进土壤团聚体稳定性^[33],黄河上游宁夏段泥沙和灌淤土不同粒径团聚体速效氮磷含量相关性动态变化较大,不同灌溉时期黄河泥沙和灌淤土土壤颗粒组成的相关性、不同粒径团聚体结构关系及稳定性变化还需要深入研究。

4 结论

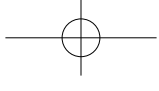
(1) 黄河宁夏段泥沙机械稳定性团聚体数量及稳定性具有较大时间变异性,<0.25 mm 粒径团聚体比例占70.8%~87.5%;不同灌溉时期泥沙团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD表现为8月>10月>5月。黄河泥沙团聚体稳定性显著低于灌淤土,泥沙中<0.25 mm 微团聚体对农田灌淤土贡献较大。

(2) 黄河宁夏段泥沙各粒径团聚体无机氮以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主,占78.9%~99.3%,灌淤土不同粒径团聚体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于8和10月泥沙。不同灌溉时期泥沙 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均以1~2 mm 粒级团聚体最高。黄河泥沙不同粒径团聚体有效磷含量均显著低于灌淤土同粒径颗粒,泥沙中1~2和0.5~1 mm 团聚体有效磷含量较高。

(3) 5、8月黄河泥沙和灌淤土各粒径团聚体无机氮含量呈正相关,而在10月二者呈负相关。5、8、10月黄河泥沙和灌淤土各粒径团聚体有效磷含量均呈负相关。

参考文献:

- [1] 王兆印,王文龙,田世民. 黄河流域泥沙矿物成分与分布规律[J]. 泥沙研究, 2007(5): 3-10.
- [2] 胡国华,赵沛伦,肖翔群. 黄河泥沙特性及对水环境的影响[J]. 水利水电技术, 2004, 35(8): 17-20.
- [3] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [4] 王俊杰,拾兵,巴彦斌. 近70年黄河入海水沙通量演变特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 57-62, 69.
- [5] 李颖曼,焦鹏,张晓华,等. 宁夏清水河流域近60年降水量及入黄沙量变化[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 184-189.
- [6] 路新飞. 含沙量和泥沙粒径对水流特性的影响[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [7] 陈静生,洪松,王立新,等. 中国东部河流颗粒物的地球化学性质[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 417-427.
- [8] 毛伟兵,王景元,孙玉霞,等. 入田泥沙对黄河三角洲地区土壤物理性状的影响——以小开河引黄灌区为例[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 212-217.
- [9] 李晓爽,党红凯,宋妮,等. 肥-沙混施对盐碱地冬小麦群体库源关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1695-1705.
- [10] 王吉智. 宁夏引黄灌区的灌淤土[J]. 土壤学报, 1984, 21(4): 434-437.
- [11] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous sediments[J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 8: 130-132.
- [12] Sorokina O A, Zarubina N V. The content of chemical elements in alluvial soils and bottom sediments of the Ural River (the Amur River basin)[J]. Eurasian Soil Science, 2013, 46(6): 644-653.
- [13] 其勒格尔,王晓丽,乌英嘎,等. 黄河内蒙古段表层沉积物氮形态及其影响因素研究[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 141-145, 174.
- [14] 郑泉. 泥沙含量对黄河兰州段氨氮降解过程和水质监测结果影响的试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2001.
- [15] 马钦,李北罡,焦小宝. 黄河表层沉积物中磷的分布特征及磷的生物可利用性[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2379-2384.
- [16] 李北罡,刘培怡. 黄河上游沉积物中磷的存在形态及生物可利用性[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 185-191.
- [17] 黄磊,方红卫,王靖宇,等. 河流泥沙磷迁移过程的数学模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 394-402.



- [18] 黄圣杰, 陈俊朴, 陈涛, 等. 不同覆盖模式对樱桃园土壤团聚体及碳氮的影响 [J]. 水土保持研究, 2022, 29 (1): 44-50.
- [19] 高健永, 王楚涵, 张慧芳, 等. 复垦土壤团聚体稳定性和胶结物质对不同施肥的响应 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (4): 1042-1050.
- [20] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价 [J]. 土壤学报, 2001, 38 (1): 49-53.
- [21] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (3): 415-421.
- [22] 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.
- [23] 吴思南, 符素华. 土壤团聚体对泥沙沉降速度的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (6): 78-84.
- [24] 庞红丽. 黄河宁蒙段粗泥沙特征及物源示踪研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [25] 李晓丽, 王成宝, 杨思存, 等. 深松深度对灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (3): 9-17.
- [26] 王西和, 杨金钰, 王彦平, 等. 长期施肥措施下灰漠土有机碳及团聚体稳定性特征 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 1-8.
- [27] 白洁瑞, 刘庆峰, 于建光, 等. 玉米、三叶草秸秆和蚯蚓堆肥施用对黄河故道潮土理化性状的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (6): 18-24.
- [28] Morse J L, Megonigal J P, Walbridge M R. Sediment nutrient accumulation and nutrient availability in two tidal freshwater marshes along the Mattaponi River, Virginia, USA [J]. Biogeochemistry, 2004, 69 (2): 175-206.
- [29] 赵营, 刘汝亮, 冒辛平, 等. 宁夏段黄河水中氮磷浓度及其赋存形态特征 [J]. 宁夏农林科技, 2017, 58 (5): 36-40.
- [30] 于子涵, 郑子成, 王永东, 等. 川西低山丘陵区植茶土壤团聚体矿质氮分布特征 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 263-267.
- [31] 王而力, 王嗣淇. 西辽河不同粒级沉积物对磷的吸附特征 [J]. 中国环境科学, 2012, 32 (6): 1054-1061.
- [32] 李英臣, 杨凤姣, 李仪颖, 等. 黄河下游河漫滩和由其开垦的农田土壤碳、氮和磷含量 [J]. 湿地科学, 2021, 19 (4): 479-485.
- [33] 朱凯, 马茂华, 李文娟, 等. 三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31 (7): 1503-1513.

Distribution characteristics of available nitrogen and phosphorus in the aggregates of sediment and the irrigation silting soils in Ningxia section of the Yellow River

ZHAO Ying^{1, 2}, LIU Xiao-tong^{1, 2}, MAO Xin-ping^{1, 2}, LUO Jian-hang¹, KE Ying¹, ZHANG Xue-jun¹ (1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan Ningxia 750002; 2. National Agricultural Experimental Observation Station for Agricultural Environment in Yinchuan, Yinchuan Ningxia 750002)

Abstract: In order to make clear the characteristics of soil aggregate and fertility in irrigation silting soils affected by sediment input in Ningxia section of the Yellow River, sediments were dynamically sampled in May (spring irrigation), August (summer irrigation), and October (winter irrigation) in the main river; and in contrast to irrigation silting soils, the mechanical composition, mechanical stable aggregates and their nitrate, ammonium nitrogen, and available phosphorus contents were determined, respectively. The results showed that sediment aggregate of <0.25 mm accounted for 70.8% ~ 87.5%; aggregates of >0.25 mm, mean weight diameter, and geometric mean diameter of sediment were showed as August>May>October, and its aggregates stability was significantly lower than that in the irrigation silting soils. Nitrate contents in different particle size aggregates of sediment accounted for 78.9% ~ 99.3% of mineral nitrogen. Available phosphorus contents were even higher in aggregates of 1 ~ 2 or 0.5 ~ 1 mm in sediment. Mineral nitrogen contents in different aggregates between sediment of May/August and irrigation silting soils was positively correlated, but the correlation was negative in October. Available phosphorus contents in different particle size aggregates between sediment and irrigation silting soils was always negatively correlated. Therefore, sediment aggregates of <0.25 mm have a great influence on aggregate structure in the irrigation silting soils, and available nitrogen and phosphorus is the highest in different particle size aggregates of sediment during spring irrigation period in Ningxia section of the Yellow River.

Key words: Ningxia section of the Yellow River; sediment; mechanical stable aggregates; mineral nitrogen; available phosphorus