



长期秸秆还田对青藏高原东部农田栗钙土团聚体稳定性及磷素分布的影响

周 梅, 赵远征, 胥婷婷, 张 洋, 王鑫淼, 张 荣*

(青海大学农林科学院土壤肥料研究所, 青海 西宁 810016)

摘 要: 为了研究长期秸秆还田对青藏高原东部小麦地不同土层团聚体分布、稳定性及磷素分布的影响, 以长期秸秆还田定位试验为研究对象, 设置氮磷肥 (NP)、氮磷钾肥 (NPK)、氮磷肥加半量秸秆还田 (NPS1)、氮磷肥加全量秸秆还田 (NPS2)、氮磷钾肥加半量秸秆还田 (NPKS1)、施氮磷钾肥加全量秸秆还田 (NPKS2) 6 个处理。于小麦收获后, 取 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤, 采用干湿筛结合的方法测定各土层水稳性团聚体组成, 量化全土中的全磷、有效磷含量及各团聚体组分中的有效磷贡献率。结果表明, 与单施化肥处理 (NP 和 NPK) 相比, 秸秆还田处理 (NPS1、NPS2、NPKS1、NPKS2) 显著提高了 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层全土的有效磷含量 ($P < 0.05$), 分别提高了 9.1% ~ 27.4% 和 5.1% ~ 38.4%, 且全量秸秆还田的有效磷含量最高。所以秸秆还田处理均表现为 >2 mm 大团聚体质量百分比随着土壤深度的增加而显著降低, <0.25 mm 团聚体质量百分比随着土壤深度的增加显著提高。秸秆还田处理还提高了团聚体平均重量直径和几何平均直径, 降低了不稳定团粒指数, 增强了团聚体稳定性, 尤其是全量秸秆还田的团聚体。秸秆还田处理还显著提高了各土层、各粒径团聚体有效磷含量 ($P < 0.05$), 3 个土层的增幅分别为 0.2% ~ 47.2%、1.5% ~ 63.2% 和 4.0% ~ 91.1%, 且 >0.25 mm 团聚体是有效磷贡献率的主要载体。全量秸秆还田更有利于促进大团聚体的形成, 提高团聚体稳定性, 调节团聚体中磷素分布, 提高磷素活性。

关键词: 长期秸秆还田; 水稳性团聚体; 团聚体稳定性; 磷素分布

青海省位于中国西部、青藏高原的东部, 春小麦是青海省的主要农作物之一。据 2022 年《青海统计年鉴》统计, 2021 年青海省春小麦播种面积占全省农作物播种总面积的 32.68%^[1]。根据全国小麦平均谷草比计算, 2021 年青海省有 48.08 万 t 的春小麦秸秆产生^[2]。小麦秸秆含有丰富的有机质和氮、磷、钾等元素, 还田后能改良土壤质量, 有效化土壤养分^[3]。

土壤团聚体由土壤颗粒和微生物、植物、动物残留物及其分泌物衍生的有机质聚集而成^[4], 是土壤结构的基本单元, 有利于调节土壤中的水、肥、气、热及养分供给, 提高农艺生产力, 增强土壤抗侵蚀能力^[5]。不同粒径团聚体则决定着土壤中孔隙的空间分布和数量, 以及土壤养分的供

应、保持及转化等作用^[6], 从根本上影响土壤质量、肥力和可持续性^[7]。研究表明, 秸秆还田可以提高团聚体的稳定性和促进大团聚体的形成^[8-12]; 但也有数据表明秸秆深还田条件下, 土壤水稳性团聚体主要集中在 <0.25 mm 粒级中^[13], 说明秸秆降解释放的营养物质直接或间接地促进了土壤团聚体的增长^[14], 土壤团聚体差异受土壤类型、耕作方式、还田深度、生态环境等因素的影响^[15]。

磷是小麦生长发育所必须的大量矿质元素之一, 有利于小麦开花、生长发育和籽粒的形成^[16]。随着团聚体粒径的增大, 磷素的固定减小, 磷素的释放增多^[17]。而长期有机物配施磷肥还田, 使土壤中的全磷集中在 >1 mm 粒径的团聚体中, 并显著提高粒径 >2 mm 团聚体中的有效磷含量和磷的有效性^[18]。而 He 等^[19]的研究表明全磷、有机磷主要集中在 <0.1 mm 的团聚体中。学者广泛研究了施肥^[20-21]、不同管理措施^[22] 和不同土地利用类型^[23] 下, 磷在团聚体组分中的分布, 但很少有学者研究秸秆还田对团聚体有效磷含量的影响。本研

投稿日期: 2023-09-12; 录用日期: 2023-11-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1900403)。

作者简介: 周梅 (1996-), 硕士研究生, 主要从事植物营养与肥料方面的研究。E-mail: 2540640209@qq.com。

通讯作者: 张荣, E-mail: zhro2004038@sohu.com。

究借助青海省农林科学院的长期秸秆还田定位试验,分析长期秸秆还田对不同土层土壤水稳性团聚体分布、稳定性的影响以及团聚体有效磷的变化特征,阐明秸秆还田后各粒级团聚体有效磷与团聚体之间的关系,旨在为土壤磷素可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期秸秆还田定位试验位于青海省西宁市城北区二十里铺青海省农林科学院试验园区(36° 34′ 03″ N, 101° 49′ 17″ E),海拔 2360 m。试验始于 1992 年。试验点属于青藏高原地带,属半干旱大陆性气候,年降水量 368.2 mm,年日照时数 2762 h,年均气温 5.7 ℃,无霜期 130 d。土壤类型为栗钙土,土壤质地为中壤,建点时土壤基础理化性质为有机质 18.3 g/kg、全氮 1.27 g/kg、硝态氮 42.6 mg/kg、铵态氮 33.8 mg/kg、有效磷 30.4 mg/kg、速效钾 177.3 mg/kg、pH 7.6、阳离子交换量 13.8 cmol/kg。

1.2 试验设计

长期定位实验点共设置了 6 个处理:施氮磷肥(NP);施氮磷肥加半量秸秆还田(NPS1);施氮磷肥加全量秸秆还田(NPS2);施氮磷钾肥(NPK);施氮磷钾肥加半量秸秆还田(NPKS1);施氮磷钾肥加全量秸秆还田(NPKS2)(表 1)。试验采用完全随机区组设计,每个处理 4 次重复,小区面积为 25 m²。供试春小麦品种为“青春 38”,每小区播种 31 行,每行播种 23 g,行距 15 cm。具体施肥量见表 1,其中磷肥、钾肥和 70% 氮肥作为基肥施入,30% 氮肥于拔节期追施。秸秆还田处理于每季小麦收获后将原小区内小麦秸秆直接粉碎还田,其中半量秸秆还田量约 5000 kg/hm²,全量秸秆还田量约 10000 kg/hm²。

表 1 春小麦长期定位试验处理及肥料用量 (kg/hm²)

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	小麦秸秆还田量
NP	147	55.2	0	0
NPS1	147	55.2	0	5000
NPS2	147	55.2	0	10000
NPK	147	55.2	150	0
NPKS1	147	55.2	150	5000
NPKS2	147	55.2	150	10000

1.3 样品采集

2022 年于春小麦收获后采用五点取样法,分别采集各小区 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层原状土样 1500 g 左右装入硬质塑料保鲜盒内,除去植物根系、杂草、小石块等杂物带回实验室,沿土块自然裂缝掰成直径约 1 cm 的土块后自然风干备用。土壤分为两部分,一部分自然风干,用于测定全磷和有效磷含量,另一部分用于测定土壤团聚体。

1.4 测定方法

土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 酸溶法提取,钼锑抗比色法测定;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法测定^[24];团聚体分级采用干筛与湿筛结合的方法测定^[25]。干筛法(机械稳定性团聚体):采用四分法称取 200 g 风干土样铺在按孔径(2、1、0.5、0.25、0.053 mm)由大到小叠放的土壤筛上,用 DM185 土壤干式团粒分析仪筛分 5 min,分离出 >2、2 ~ 1、1 ~ 0.5、0.5 ~ 0.25、0.25 ~ 0.053 和 <0.053 mm 的机械稳定性团聚体,并称重、计算各粒径所占比例。湿筛法(水稳性团聚体):将干筛后收集的各粒径土壤团聚体,按比例配成 50 g 土样均匀铺在套筛(2、0.25、0.053 mm)最上层,并置于水桶中浸泡 10 min,以振幅 4 cm、每分钟 40 次的频率上下振荡 8 min(TTF-100 型土壤团粒分析仪)。将振荡好的土壤团聚体分粒径转移到铝盒中,于 60 ℃ 烘干称重。得到 >2、0.25 ~ 1 mm 的大团聚体和 0.053 ~ 0.25、<0.053 mm 的微团聚体,并计算各粒径水稳性团聚体所占比例。将上述土壤过 0.85 mm 筛,用于测定各粒级团聚体有效磷含量。

1.5 数据处理

土壤团聚体平均重量直径(MWD, mm)、几何平均直径(GMD, mm)、土壤不稳定团粒指数(E_{LT}, %)、团聚体有效磷贡献率(C_{AP}, %)计算公式为^[26]:

$$MWD = \sum_i^n W_i \cdot \left(\frac{X_{i+1} - X_i}{2} \right) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left(\sum W_i \cdot \ln X_i \right) \quad (2)$$

$$E_{LT} = \left[(W_T - W_{0.25}) / W_T \right] \times 100\% \quad (3)$$

$$C_{AP} = W_i \cdot C_i / C_t \times 100\% \quad (4)$$

式中, W_i 表示第 i 级团聚体质量分数(%), X_{i+1}、X_i 表示第 i 级团聚体中上、下筛子的孔径(mm); W_T 为各粒径水稳性团聚体质量总和(g), W_{0.25} 为 ≥ 0.25 mm 水稳性团聚体质量(g); C_i 为第 i 级团

聚体中有效磷含量 (mg/kg), C_t 为全土中有效磷含量 (mg/kg)。

采用 SPSS 26.0 和 Origin 2021 进行数据处理和作图, 采用单因素方差分析和邓肯检验以确定处理之间的差异显著性, 显著水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田对不同土层土壤全磷和有效磷含量的影响

土壤的全磷、有效磷含量 (表 2) 和磷活化系数 (图 1), 均随土层深度的增加呈现逐渐降低的趋势。0 ~ 10 cm 土层, NPS1 和 NPS2 处理较 NP 处理显著提高了有效磷含量和磷活化系数, 分别提高了 9.1% ~ 23.5% 和 6.3% ~ 35.7%; NPKS1

和 NPKS2 处理较 NPK 处理也显著提高了有效磷含量和磷活化系数, 分别提高了 15.0% ~ 27.4% 和 12.2% ~ 24.0%。10 ~ 20 cm 土层, NPS1、NPS2 和 NPKS1、NPKS2 处理较 NP 和 NPK 处理相比, 有效磷含量和磷活化系数分别显著提高了 5.1% ~ 38.4% 和 0.4% ~ 31.5%。说明秸秆还田能促进土壤中全磷向有效磷的转化, 提高土壤中磷的有效性; 且秸秆还田量越多, 土壤的有效磷含量及磷活化系数越高。20 ~ 30 cm 土层, 除 NPKS2 处理比 NPK、NP 处理有效磷显著提高外, 各处理间有效磷含量和磷活化系数无显著变化。0 ~ 10 cm 土层, NPS2、NPK、NPKS1、NPKS2 与 NP 处理相比, 全磷显著增加, 其余各土层各处理全磷含量无显著变化, 秸秆还田处理较单施化肥处理提高了 4.9% ~ 13.6%。

表 2 不同土层土壤全磷和有效磷含量

处理	全磷 (g/kg)			有效磷 (mg/kg)		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm
NP	1.03 ± 0.09b	1.02 ± 0.08a	0.87 ± 0.03a	32.03 ± 5.41b	23.98 ± 2.81b	18.80 ± 2.75b
NPS1	1.12 ± 0.04ab	1.07 ± 0.05a	0.95 ± 0.06a	34.93 ± 6.10ab	30.58 ± 6.06ab	28.23 ± 9.64ab
NPS2	1.13 ± 0.05a	1.07 ± 0.08a	0.95 ± 0.11a	39.55 ± 4.48ab	33.18 ± 6.85a	24.33 ± 5.10ab
NPK	1.14 ± 0.03a	1.04 ± 0.04a	0.92 ± 0.08a	32.65 ± 3.08b	27.68 ± 2.91ab	20.33 ± 4.60b
NPKS1	1.16 ± 0.05a	1.09 ± 0.03a	0.96 ± 0.08a	37.53 ± 4.13ab	29.10 ± 6.57ab	22.48 ± 3.76ab
NPKS2	1.17 ± 0.10a	1.09 ± 0.06a	0.99 ± 0.08a	41.55 ± 4.31a	34.85 ± 5.24a	30.43 ± 7.73a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

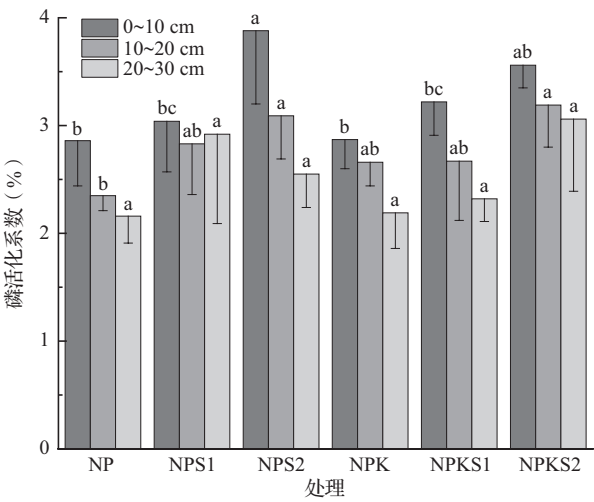


图 1 不同土层磷活化系数

注: 数据表示方法为平均值 ± 标准差, 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 长期秸秆还田对水稳性团聚体组成的影响

随着土层的增加, >2 mm 团聚体质量百分比

显著减小, 0.053 ~ 0.25 和 <0.053 mm 团聚体质量百分比显著增加 (图 2)。长期秸秆还田显著影响 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 土层中团聚体质量百分比, 且随着粒径的减小, 团聚体质量百分比呈现逐渐下降的趋势; 但 20 ~ 30 cm 土层中各团聚体质量百分比则无显著变化。0 ~ 10 cm 土层, 与 NP 和 NPK 处理相比, NPS1、NPS2、NPKS1 和 NPKS2 处理显著提高了 >2 mm 团聚体质量百分比, 提高了 28% ~ 30%; 显著降低了粒径 <0.053 mm 的团聚体质量百分比, 降低了 40.34% ~ 45.70%, 且大团聚体的增加量小于小团聚体的减少量, 说明大团聚体的形成是一个缓慢过程。10 ~ 20 cm 土层, 与 NP 和 NPK 处理相比, NPS1、NPS2、NPKS1 和 NPKS2 处理显著提高了 >2 mm 团聚体质量百分比, 提高了 8.5% ~ 25.4%; 显著减小了粒径 <0.053 mm 的团聚体质量百分比, 降低了 16.8% ~ 29.2%。

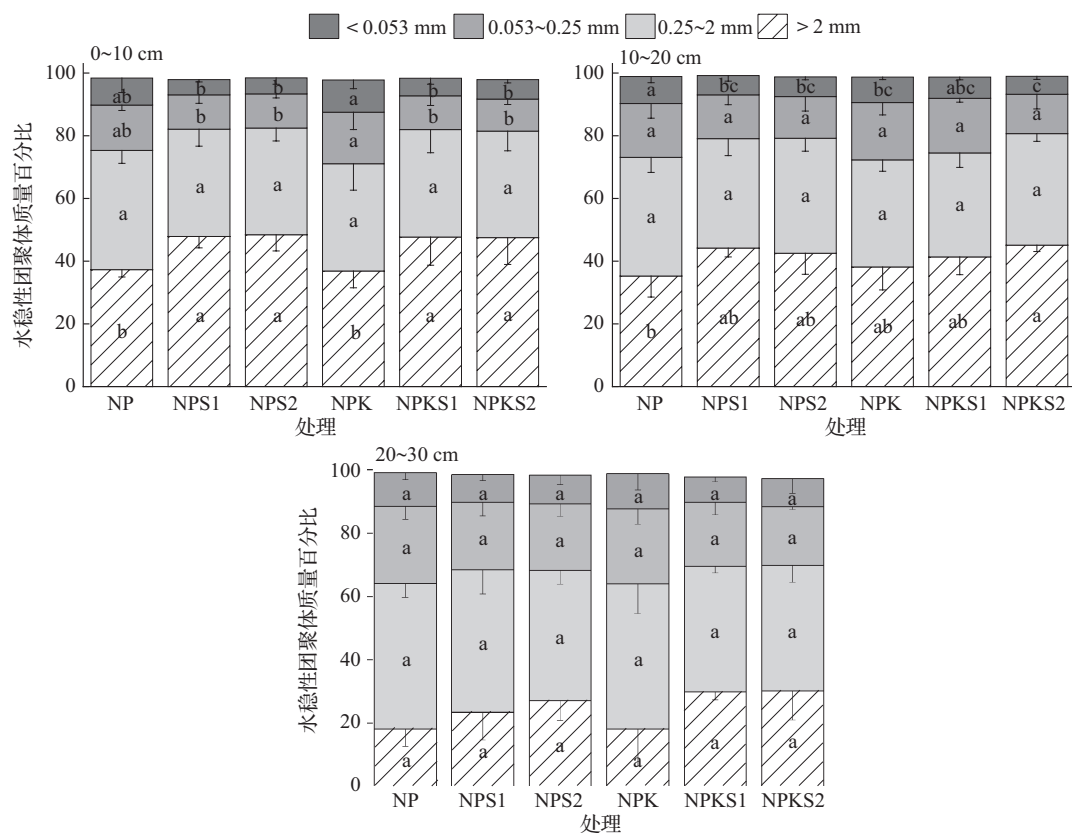


图2 长期秸秆还田下不同土壤深度水稳性团聚体质量

2.3 长期秸秆还田对水稳性团聚体稳定性指标的影响

随着土壤深度的增加,团聚体平均重量直径和几何平均直径显著减小(表3),而不稳定团粒指数显著增大(图3)。长期秸秆还田能显著提高团聚体稳定性,稳定性表现为0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm。与NP和NPK处理相比,NPS1、NPS2、NPKS1和NPKS2处理显著提高了团聚体的平均重量直径和几何平均直径,0~10 cm土层分别提高了21.2%~25.8%和41.4%~64.9%;10~20 cm土层,分别提高了4.1%~15.8%和28.7%~33.9%;但显著降低了不稳定团粒指数,分别降低了28.2%~38.3%和8.1%~30.3%。20~30 cm土层处理间的平均重量直径、几何平均直径和不稳定团粒指数无显著差异。

表3 不同土层团聚体平均重量直径和几何平均直径

处理	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm	
	MWD	GMD	MWD	GMD	MWD	GMD
NP	1.70b	0.87b	1.71b	0.87c	1.20a	0.57a
NPS1	2.06a	1.23a	1.98a	1.12ab	1.38a	0.69a
NPS2	2.08a	1.24a	1.95ab	1.12ab	1.47a	0.72a
NPK	1.63b	0.74b	1.77ab	0.89bc	1.20a	0.59a
NPKS1	2.05a	1.22a	1.87ab	0.99abc	1.56a	0.78a
NPKS2	2.05a	1.19a	2.02a	1.19a	1.58a	0.80a

注:MWD、GMD分别为平均重量直径、几何平均直径。

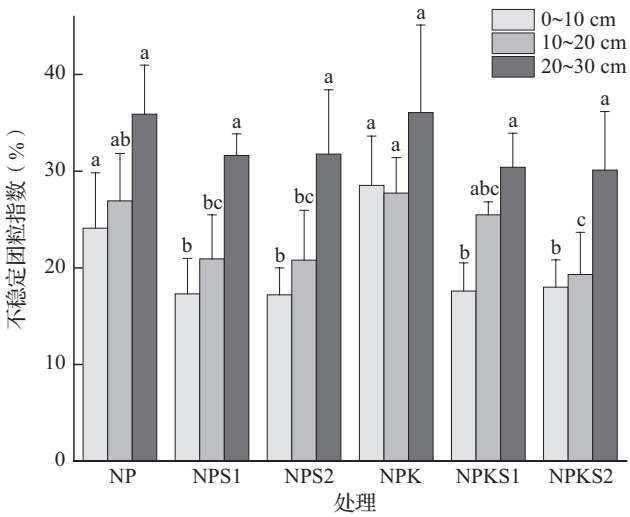


图3 不同土层团聚体不稳定团粒指数

2.4 长期秸秆还田对团聚体有效磷含量的影响

3个土层有效磷含量变化趋势一致,随着土层的加深,团聚体有效磷含量显著降低;随着粒径的减小,团聚体有效磷含量逐渐减小(图4)。有效磷含量主要集中在粒径>2和0.25~2 mm的团聚体中,粒径<0.053 mm团聚体有效磷含量最低。

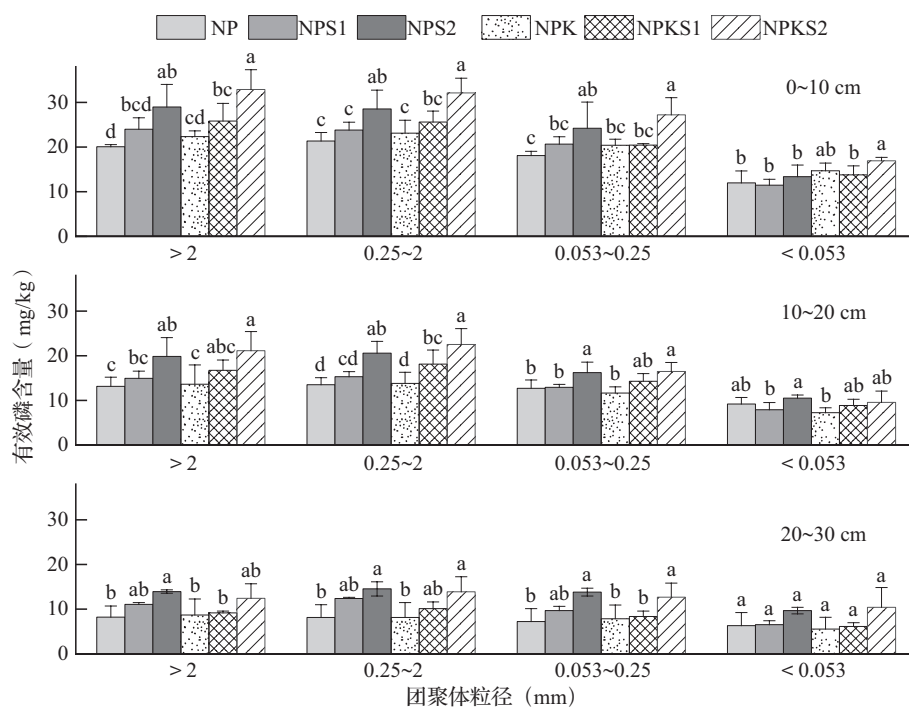


图4 不同土层团聚体有效磷含量

秸秆还田处理能提高各土层各粒径团聚体（除粒径<0.053 mm的团聚体）有效磷含量，且秸秆还田量越高，团聚体有效磷含量越高。与NP和NPK处理相比，NPS1、NPS2和NPKS1、NPKS2处理均提高了>2、0.25~2和0.053~0.25 mm团聚体有效磷含量，仅NPS2和NPKS2处理达到显著水平。0~10 cm土层，有效磷含量分别提高了19.4%~47.2%、10.7%~38.8%和0.2%~33.8%；10~20 cm土层，有效磷含量分别显著提高了13.6%~55.1%、13.2%~63.2%和1.5%~41.6%；20~30 cm土层，>2、0.25~2和0.053~0.25 mm粒径团聚体有效磷含量的增幅分别为5.3%~70%、24.3%~78.2%和6.4%~91.1%。各土层各处理<0.053 mm的团聚体有效磷含量无显著变化。

2.5 长期秸秆还田对各粒径团聚体有效磷贡献率的影响

土壤有效磷贡献率最大是粒径>2和0.25~2 mm团聚体，其次是粒径0.053~0.25 mm团聚体，

粒径<0.053 mm团聚体的贡献率最小（图5）。秸秆还田能显著提高0~10 cm土层>2 mm团聚体有效磷贡献率，显著降低了<0.053 mm团聚体有效磷贡献率。

0~10 cm土层，NPS1、NPS2处理与NP处理相比和NPKS1、NPKS2处理与NPK处理相比，均显著提高了粒径>2 mm团聚体有效磷贡献率，分别提高了9.63%~33.14%和23.18%~52.72%；但显著降低了0.053~0.25和<0.053 mm粒径团聚体有效磷贡献率，0.053~0.25 mm粒径团聚体分别显著降低了31.06%~35.93%和30.16%~44.07%；<0.053 mm粒径团聚体分别显著降低了58.33%~64.39%和43%~58.96%。10~20和20~30 cm土层各粒径团聚体（除<0.053 mm粒径团聚体外）有效磷贡献率无显著变化。20~30 cm土层，0.25~2 mm粒径团聚体的有效磷贡献率最大。以上说明土壤团聚体有效磷贡献率与团聚体组成密切相关，受秸秆还田量显著影响。

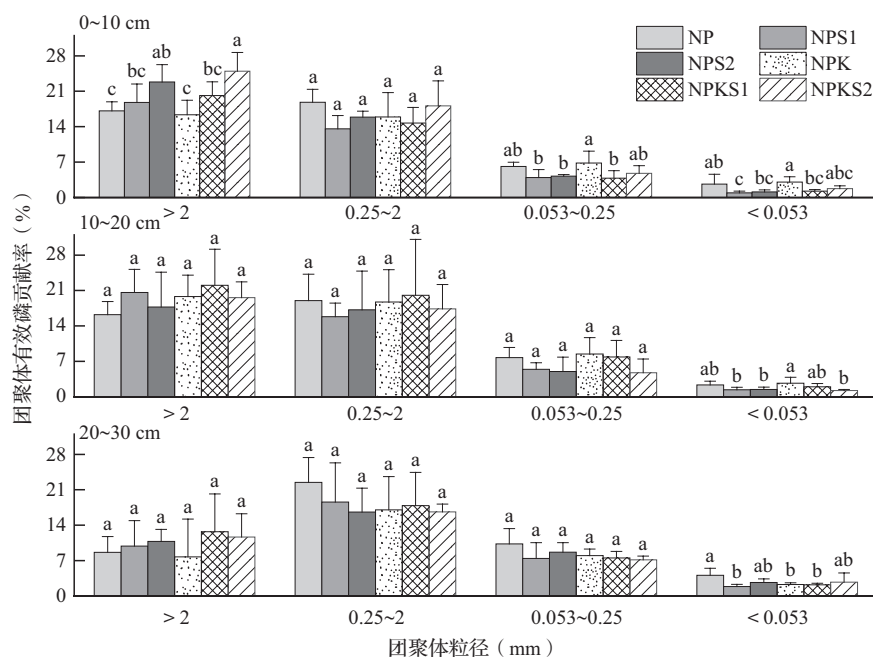


图5 不同土层团聚体有效磷贡献率

3 讨论

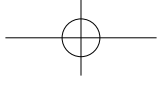
3.1 长期秸秆还田对不同土层深度土壤有效磷、全磷含量及团聚体磷素分配的影响

小麦秸秆富含氮、磷、钾等作物生长所必需的养分^[27], 还田可以改善土壤质量、改良土壤结构、增强土壤保水保肥能力^[28-30]。王秀娟等^[31]的研究表明, 秸秆还田能显著提高土壤中的有效磷含量, 促进植物对磷的吸收, 提高磷素利用率, 但土壤全磷无显著变化。而董守坤等^[32]的研究表明, 秸秆还田能增加白浆土中全磷的含量, 但对有效磷含量影响不大。Yan 等^[33]借助 10 年的秸秆还田试验发现, 秸秆还田提高了土壤全磷和有效磷含量, 降低了土壤不稳定磷的比例, 增强了土壤对磷的供应能力。本试验发现, 长期秸秆还田处理下, 3 个土层土壤全磷均无显著变化; 但不同土层有效磷含量随着秸秆还田量的增加而增加, 但随着土层深度的增加增幅减小。土壤全磷无显著变化的原因可能是秸秆的磷含量有限, 且青海地区气候冷凉, 降水量少且集中、太阳辐射强等特点导致小麦秸秆腐解速率和养分释放慢^[34]。土壤有效磷增加的原因可能有 2 个方面: 一是秸秆还田后, 腐解过程中, 一些易释放的磷进入土壤, 直接提高了土壤中有效磷的含量^[35]; 二是秸秆还田能提高土壤中磷酸酶酶活、调节土壤 pH 和促进微生物的活动, 促进其他形态

的磷向有效磷转化, 且转化磷量与秸秆还田量呈正比, 与土壤深度呈反比^[36-37]。

不同粒径团聚体的生物、化学和物理性质不同, 对磷素的保持和供给也不同。前人的研究发现, 土壤中大团聚体比微团聚体的含磷量高^[38-39]。本研究发现秸秆还田处理显著提高了 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层各粒径团聚体有效磷含量 (除了粒径 <0.053 mm 团聚体), 且与秸秆还田量呈正比, 与土壤深度呈反比。与单施化肥处理相比, 秸秆还田处理有效磷含量整体表现为随团聚体粒径的减小而降低的趋势, 表明 >2 mm 团聚体对磷素的累积作用高于 <0.25 mm 小团聚体。这与 Cui 等^[40]的研究一致, 土壤团聚体中全磷、活性无机磷、活性有机磷和残余磷随团聚体粒径的减小而降低, 中等有机磷在大团聚体 (0.25 ~ 1 mm) 和小团聚体 (0.053 ~ 0.25 mm) 中富集。Wei 等^[41]的研究发现, 长期有机肥化肥配施提高了各粒径团聚体全磷含量。可能是因为不同粒径团聚体中的有机酸和有机质含量不同, 其中有效磷主要由有机酸活化释放的无机磷组成^[42], 而有机质能降低土壤对磷的吸附^[43]。徐悦等^[44]研究发现, 秸秆还田可以显著提高砂姜黑土无机磷组分中磷酸二钙、磷酸铝及磷酸铁的含量, 且它们与有效磷含量呈极显著正相关关系。

大团聚体是土壤有效磷贡献的主要载体^[15],



本研究中,土壤有效磷贡献率最大的是粒级 >2 和 $0.25 \sim 2$ mm,秸秆还田处理能显著提高 $0 \sim 10$ cm 土层 >2 mm 团聚体有效磷贡献率,显著降低了 <0.053 mm 团聚体有效磷贡献率,与赵哲萱等^[45]的研究结果一致。这是因为团聚体有效磷贡献率由某一个粒级团聚体含量与该粒级团聚体有效磷含量共同决定,所以秸秆还田后显著提高了大团聚体质量百分数和有效磷含量,从而提高了大团聚体有效磷贡献率^[46]。

3.2 长期秸秆还田对水稳性团聚体组成及稳定性的影响

水稳性团聚体是反映土壤优劣的重要指标,良好的团聚体组成能维持土壤的疏松结构,更有利于植物的生长和对养分的吸收。而团聚体的平均重量直径和几何平均直径越大,团聚体不稳定团粒指数越小,团聚体越稳定。本研究发现 $0 \sim 10$ 和 $10 \sim 20$ cm 土层,与单施化肥处理相比,秸秆还田处理能显著提高 >2 mm 团聚体的含量;显著降低 <0.25 mm 团聚体含量。秸秆还田处理显著提高了平均重量直径和几何平均直径,显著降低了不稳定团粒指数。说明秸秆还田有利于微团聚体胶结成大团聚体,从而提高了团聚体稳定性。可能是因为一是秸秆在腐解的过程中会分解产生各类有机质,较小的土壤颗粒通过有机质和作物根共同作用将他们聚集在一起,胶结成大团聚体^[6, 29];二是秸秆在腐解过程中会释放大量养分,促进植物根系的生长发育,加速植物根系的代谢,分泌更多土壤胶结化合物促进大团聚体的形成^[47]。Zhao 等^[48]的研究发现,秸秆还田能显著提高 >2 mm 团聚体含量,显著减少 <0.25 mm 团聚体含量。韩紫璇等^[28]依托 40 年的长期秸秆还田试验得出相同的结论,充分说明了秸秆还田可以提高土壤大团聚体含量,减少微团聚体的含量。而 $20 \sim 30$ cm 土层,各粒径团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径、不稳定团粒指数均无显著变化。可能是因为秸秆还田和施肥主要集中在 $0 \sim 20$ cm 土层;而且小麦根系的分枝主要分布在 $0 \sim 20$ cm 土层中,且 $0 \sim 20$ cm 土层中的根系较为发达^[49],所以对深层土壤的团聚体及稳定性影响较小。

4 结论

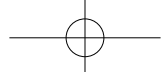
与单施化肥处理相比,秸秆还田处理显著提高了 $0 \sim 10$ 和 $10 \sim 20$ cm 土层土壤有效磷含量,

>2 mm 团聚体质量百分比,但显著降低了 <0.053 mm 团聚体质量百分比,增强了团聚体稳定性,尤其是全量秸秆还田处理有效磷含量最高。

秸秆还田处理还能显著提高各土层、各粒径团聚体有效磷含量,使有效磷主要集中在粒径 >0.25 mm 的大团聚体中, >0.25 mm 团聚体是有效磷贡献率的主要载体。

参考文献:

- [1] 青海省统计局. 青海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109–1118.
- [3] 陈盛, 黄达, 张力, 等. 秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 1–11.
- [4] Yan Y, Hua L C, Jian P Z. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China[J]. Catena, 2015, 133: 412–419.
- [5] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 151: 82–92.
- [6] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2857–2865.
- [7] Lehmann A, Leifheit E F, Rillig M C. Mycorrhizas and soil aggregation[M] //Mycorrhizal mediation of soil. Amsterdam: Elsevier, 2017: 241–262.
- [8] 石艳香, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 856–863.
- [9] 王红儒, 王继红. 复合菌剂对秸秆还田下的黑土性质的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1–8 [2023–04–11]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2023.20146>.
- [10] 赵哲萱, 冉成, 孟祥宇, 等. 秸秆还田对苏打盐碱稻区土壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(5): 582–591.
- [11] 黄璐, 赵国慧, 李廷亮, 等. 秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 123–132.
- [12] Zhao H, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 178–186.
- [13] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 119–125.
- [14] Huang R, Lan M, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of



- different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (36): 27942–27952.
- [15] 刘学彤, 郑春莲, 曹彩云, 等. 长期秸秆还田对潮土水稳性团聚体的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49 (24): 215–220.
- [16] 柳开楼, 都江雪, 郭磊, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39 (6): 1115–1123.
- [17] Wang X, Yost R S, Linquist B A. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65 (1): 139–146.
- [18] 陈惟财, 谢小立, 王凯荣. 不同施肥模式下红壤性水稻土中磷的分布及其有效性[J]. *水土保持学报*, 2008, 22 (3): 87–90, 100.
- [19] He Z L, Wilson M J, Campbell C O, et al. Distribution of phosphorus in soil aggregate fractions and its significance with regard to phosphorus transport in agricultural runoff [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1995, 83: 69–84.
- [20] Ranatunga T D, Reddy S S, Taylor R W. Phosphorus distribution in soil aggregate size fractions in a poultry litter applied soil and potential environmental impacts[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 446–452.
- [21] Wan W, Li X, Han S, et al. Soil aggregate fractionation and phosphorus fraction driven by long-term fertilization regimes affect the abundance and composition of P-cycling-related bacteria[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104475.
- [22] Wei K, Chen Z H, Zhang X P, et al. Tillage effects on phosphorus composition and phosphatase activities in soil aggregates[J]. *Geoderma*, 2014, 217: 37–44.
- [23] Li F, Liang X, Li H, et al. Enhanced soil aggregate stability limits colloidal phosphorus loss potentials in agricultural systems [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32 (1): 1–14.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 张秀芝. 长期施肥对黑土及团聚体中有机磷形态的影响及转化研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [26] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (9): 3257–3266.
- [27] Shen J, Tang H, Liu J, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 264–274.
- [28] 韩紫璇, 房静静, 武雪萍, 等. 长期秸秆配施化肥下土壤团聚体碳氮分布、微生物量与小麦产量的协同效应[J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (8): 1503–1514.
- [29] 王凤仁, 逢蕾, 沈健林, 等. 秸秆还田下双季稻田土壤团聚体碳氮磷含量及生态化学计量比特征[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44 (3): 550–557.
- [30] 孙玉禄, 李杨, 刘晓辉, 等. 秸秆还田对设施番茄产量和土壤磷素的影响[J]. *微生物学杂志*, 2022, 42 (3): 61–66.
- [31] 王秀娟, 解占军, 何志刚, 等. 秸秆还田条件下减量施肥对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47 (8): 39–44.
- [32] 董守坤, 刘丽君, 马秀峰, 等. 秸秆还田对白浆土养分含量的影响[J]. *作物杂志*, 2011 (1): 53–55.
- [33] Yan S, Liu C, Li J, et al. Changes in the soil phosphorus supply with rice straw return in cold region [J]. *Agronomy*, 2023, 13 (9): 2214.
- [34] 梁鑫宇, 宋明丹, 韩梅, 等. 不同农作物秸秆腐解规律及模型预测评价[J]. *核农学报*, 2023, 37 (6): 1244–1252.
- [35] 赵小军, 李志洪, 刘龙, 等. 种还分离模式下玉米秸秆还田对土壤磷有效性及其有机磷形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (1): 243–247.
- [36] Yang C, Lu S. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150325.
- [37] 柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (1): 95–109.
- [38] 邓伟明, 唐梦天, 郭玉栋, 等. 生物炭与磷肥添加对红壤团聚体及其磷组分分布的影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54 (2): 352–363.
- [39] 李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (20): 3886–3895.
- [40] Cui H, Ou Y, Wang L, et al. Distribution and release of phosphorus fractions associated with soil aggregate structure in restored wetlands [J]. *Chemosphere*, 2019, 223: 319–329.
- [41] Wei W, Chen W, Wang K, et al. Effects of long-term fertilization on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water stable aggregates in paddy soil [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10 (12): 1932–1940.
- [42] 黄翊兰, 崔丽娟, 李春义, 等. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2019, 28 (10): 1999–2005.
- [43] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, 26 (6): 1034–1038.
- [44] 徐悦, 陈翔, 王擎运, 等. 小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (8): 1768–1777.
- [45] 赵哲萱, 冉成, 孟祥宇, 等. 秸秆还田对苏打盐碱稻区土壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2023, 45 (5): 582–591.
- [46] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (11): 1978–1986.

- [47] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2022, 54 (2): 344–350.
- [48] Zhao H, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize–wheat double cropping system [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 178–186.
- [49] 付锦州, 周苏玫, 韩亚倩, 等. 小麦根系形态数量性状的时空分布及其与土壤养分的关系研究[J]. 核农学报, 2023, 37 (3): 626–637.

Effects of long-term straw fertilization on the stability of calcium chestnut soil aggregates and phosphorus distribution in agricultural fields on the eastern part of the Tibetan Plateau

ZHOU Mei, ZHAO Yuan-zheng, XU Ting-ting, ZHANG Yang, WANG Xin-miao, ZHANG Rong* (Soil and Fertilizer Institute, Academy of Agricultural and Forestry, Qinghai University, Xining Qinghai 810016)

Abstract: In order to study the effects of long-term straw return on the distribution and stability of aggregates and phosphorus distribution in different soil layers of wheat field in the eastern part of the Tibetan Plateau, six treatments were set up in a positioning experiment for long-term straw return, including nitrogen-phosphorus fertilizer (NP), nitrogen-phosphorus-potassium (NPK) fertilizer, nitrogen-phosphorus fertilizer plus half amount of straw returned to the field (NPS1), nitrogen-phosphorus fertilizer plus full amount of straw returned to the field (NPS2), nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer plus half amount of straw returned to the field (NPKS1), nitrogen-phosphorus-potassium fertilizer plus full amount of straw returned to the field (NPKS2). After wheat harvest, soil samples were taken from 0–10, 10–20 and 20–30 cm soil layers, and a combination of wet and dry sieving was used to determine the composition of water-stable aggregates in each soil layer, and to quantify the contents of total phosphorus, available phosphorus, and the contribution rate of available phosphorus in each aggregate component. The results showed that compared with the single application of chemical fertilizer treatments (NP and NPK), the straw-returned treatments (NPS1, NPS2, NPKS1, NPKS2) significantly increased the content of available phosphorus in the soil layers of 0–10 and 10–20 cm ($P < 0.05$), which was increased by 9.1%–27.4% and 5.1%–38.4%, respectively, and the content of available phosphorus of the treatment of the full amount of straw returned to field was the highest. Therefore, all straw treatments showed that the mass percentage of >2 mm aggregate decreased significantly with the increase of soil depth, and the mass percentage of <0.25 mm aggregate increased significantly with the increase of soil depth. The straw returned treatments also increased the mean weight diameter and geometric mean diameter of the aggregate, decreased the index of unstable aggregate, and enhanced the stability of the aggregate, especially the aggregate of the full amount of straw returned to the field. The straw returned treatments also significantly increased ($P < 0.05$) the content of available phosphorus in all soil layers and particle sizes of aggregate, with increases of 0.2%–47.2%, 1.5%–63.2% and 4.0%–91.1%, respectively, in the three soil layers, and >0.25 mm aggregate were the main carriers of the contribution of available phosphorus. The full amount of straw returned to the field was more conducive to promoting the formation of large aggregate, improving the stability of the aggregate, regulating the distribution of phosphorus in the aggregate, and improving the phosphorus activity.

Key words: long-term straw returning to field; water stable aggregate; aggregate stability; phosphorus distribution