

集约化种植下潮土养分肥力与团聚体特征相互关系研究^①

张先凤^{1,2}, 朱安宁^{1*}, 张佳宝¹, 杨文亮¹, 车威¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 封丘农业生态实验站, 南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过测定封丘潮土 7 个肥力指标有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾, 并利用主成分分析方法划分为 3 种肥力等级(一等、二等和三等肥力), 研究了集约化种植条件下潮土养分肥力与团聚体特征的相互关系。结果表明: 3 种肥力等级下, 大团聚体的质量比例最高, 微团聚体居中, 而粉黏粒最低。在 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层, 一等肥力下大团聚体的质量比例分别较三等肥力提高了 25.5%、20.0% 和 18.5%, 而微团聚体的质量比例分别降低了 54.3%、43.5% 和 33.6%; 一等肥力和二等肥力土壤团聚体的质量比例之间差异不显著。水稳性大团聚体的数量及其稳定性分别与由 7 个土壤肥力指标组成的养分肥力系统综合主成分得分 F 值呈线性正相关关系。7 个肥力指标中, 有机质、全氮和碱解氮与潮土大团聚体的质量比例及其稳定性显著正相关, 并且这种相关性随着土壤深度增加而逐渐减弱。

关键词: 集约化种植; 潮土; 养分肥力; 团聚体特征; 相关性

中图分类号: S158.5 **文献标识码:** A

土壤结构是肥力的重要基础, 是评价土壤肥力高低的重要指标之一^[1], 良好的土壤结构在维持和提高农田生产力方面发挥着重要作用^[2]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤中各种养分的储存库和微生物的生境^[3]。团聚体结构和各种土壤养分物质相互作用、相互影响^[4-5]。同时, 不同粒级团聚体在养分和水分的保蓄与供释方面具有显著不同的作用^[6]。水稳性团聚体的数量和分布可以反映土壤结构的稳定性。因此, 可以将水稳性团聚体、土壤结构的稳定性以及土壤肥力三者紧密地联系起来。好的土壤结构依赖于稳定性团聚体的形成, 一般把 $>250 \mu\text{m}$ 团聚体称为土壤团粒结构^[7]。团聚体的组成及其稳定性可以作为评价土壤质量的重要指标^[8]。大量研究表明^[9-12], 改良各项农业管理措施可以加快土壤团聚化进程, 进而培肥耕地地力, 同时团聚体颗粒有机碳的富集, 有利于土壤结构稳定性的提升^[13]。Huang 等^[10]与毛霞丽等^[14]研究发现优化施肥方案如施用有机肥或有机肥与化肥混施, 可以显著提高土壤水稳性大团聚体的含量和团聚体的稳定性, 结果土壤肥力大幅度提升。

通过改变土地利用方式, Liu 等^[11]指出不同肥力下土壤团聚体组成与各养分物质含量差异显著, 果园土中 $>5 \text{ mm}$ 大团聚体的数量随着土壤肥力提升而增加, 旱地土中 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 微团聚体的数量随着土壤肥力提升而减少, 土地利用方式与土壤肥力共同作用于土壤团聚化过程。与常规种植模式相比, 有机种植也明显促进了水稳性大团聚体的形成和土壤肥力水平的提升^[12]。为了定量反映团聚体的稳定性特征, 平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)被广泛采用作为评定指标^[15-17], 并且有研究表明, GMD 比 MWD 能更好地、更准确地反映团聚体的稳定性状况^[18]。

黄淮海平原是我国重要的农业经济区和粮食主产区, 潮土作为主要的耕作土壤, 面积达 1360 万 hm^2 , 而集约化种植已经导致土壤严重退化, 具有砂粒含量高、黏粒含量低、结构差、有机质含量低等诸多障碍因子。因此, 通过改善当地的农业管理措施, 实现潮土结构改良, 进而提升土壤肥力水平具有重要的意义。近年来, 关于土壤团聚体形成及其稳定性的研究较多, 但基于一定的标准划分土壤肥力等级, 研究不

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200304)、国家自然科学基金项目(41471239)和中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-SW-ST5-142)资助。

* 通讯作者(anzhu@issas.ac.cn)

作者简介: 张先凤(1990—), 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 主要从事土壤结构及农田碳循环方面的研究工作。E-mail: xfzhang@issas.ac.cn

同肥力等级下水稳性团聚体的数量分布及其稳定性特征还鲜有报道。本研究利用主成分分析方法, 计算由 7 个土壤肥力指标有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾组成的养分肥力系统综合主成分得分 F 值, 据此划分不同肥力等级, 研究区域潮土肥力水平与团聚体分布及其稳定性的关系, 以为改良潮土结构、提升地力和作物生产力提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究基于河南省封丘县展开, 所在地区主要气候类型为半干旱半湿润的暖温带大陆性季风气候, 多年平均降雨量为 605 mm, 主要集中在 7—9 月, 多年平均气温为 13.9℃。土壤类型主要为黄河冲积物发育形成的典型潮土, 耕层土壤质地为砂壤土。代表性生态

系统类型为冬小麦/夏玉米轮作一年两熟制农田生态系统。

1.2 研究方法

根据前人调查获得的封丘土壤肥力分布结果, 以乡镇为单位, 在不同肥力等级下随机选取采样片区共 10 个(图 1), 然后于不同片区广泛布置 8~10 个样点。从本研究思路出发, 依据不同样点 7 个土壤肥力指标组成的肥力系统综合主成分得分 F 值重新划分一等、二等和三等 3 种肥力等级。这一是为了避免土壤肥力随时间变异而引起的再分布, 二是为了减少肥力等级, 便于分析比较。本研究于 2014 年 10 月玉米收获前使用小铁铲分层(0~5、5~10 和 10~20 cm)采集原状土壤样品, 并用小刀轻轻剥去土块与铁铲直接接触处。将大块土样沿自然裂缝掰开, 以便全部土壤样品均能通过 10 mm 土筛, 于避光处自然风干。

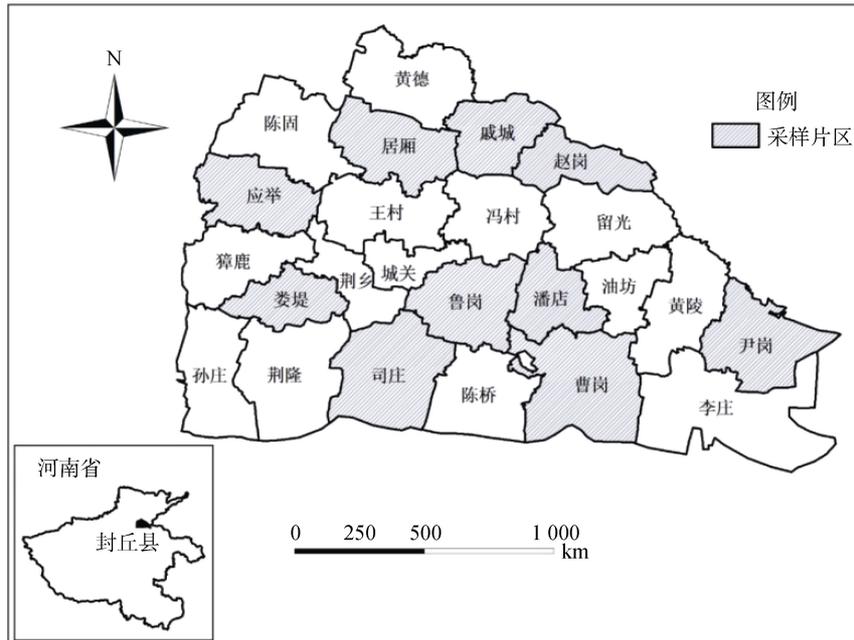


图 1 封丘县采样片区分布图

Fig. 1 Distributions of sampling areas in Fengqiu County

土壤水稳性团聚体的测定采用 Elliot^[19]提供的方法, 分离出 3 种粒径水稳性团聚体, 分别为 >250 μm (大团聚体, 下同)、250~53 μm (微团聚体, 下同) 和 <53 μm (粉黏粒, 下同)。土壤肥力指标包括有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾均采用国标法测定^[20]。团聚体的稳定性用平均重量直径和几何平均直径表示, 计算公式分别见式(1)和式(2):

$$\text{MWD} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

式中: MWD 和 GMD 分别表示团聚体的平均重量直径和几何平均直径; x_i 为第 i 级团聚体的平均直径 (mm); w_i 为第 i 级团聚体的质量比例。

1.3 数据统计与分析

数据分析采用单因素方差分析, 多重比较采用 LSD 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 对 7 个肥力指标有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速

效钾进行主成分分析(PCA),对土壤团聚体与养分肥力的关系进行回归分析和 Pearson 相关性分析,整个数据处理过程采用 SPSS17.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标的主成分分析

主成分分析得到的综合指标能反映事物的本质,表 1 是通过主成分分析计算有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾 7 个土壤肥力指标得到的各成分特征值和方差解释率。由这 7 个肥力指标组成的综合指标所表征的土壤养分肥力主成分 1(PC1,下同)和主成分 2(PC2,下同)的累积方差解释率达到 82.918%(大于 80%),因此可以用来反映土壤养分肥力系统内的变异信息。同时比较主成分的特征值与方差解释率,可以得到影响土壤养分肥力的程度 $PC1 > PC2$ 。

表 1 主成分分析的特征值与方差解释率
Table 1 Eigenvalues and proportions of variance

主成分(PC)	特征值	PV(%)	CPV(%)
1	4.376	62.521	62.521
2	1.428	20.397	82.918
3	0.763	10.897	93.815
4	0.308	4.397	98.212
5	0.091	1.303	99.515
6	0.021	0.295	99.811
7	0.013	0.189	100.000

注:PV 和 CPV 分别表示主成分的方差解释率和累积方差解释率。

根据主成分分析还可以得到 PC1 和 PC2 的因子负荷及有关得分信息,并且一般认为变量在相应主成分中的权重与因子负荷成正比^[21]。由图 2 可以看出,在 PC1 上有较高因子负荷的肥力指标包括有机质、全氮、碱解氮和速效钾,在 PC2 上有较高因子负荷的肥力指标包括全磷、有效磷和全钾,即 PC1 主要

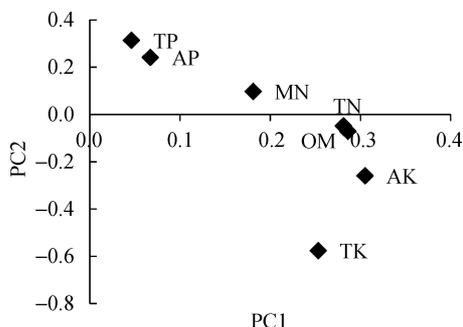


图 2 土壤肥力指标在 PC1 和 PC2 的因子负荷分布图
Fig. 2 Factor loading distributions of soil fertility indexes in PC1 and PC2

综合了有机质、全氮、碱解氮和速效钾的变异信息,PC2 主要综合了全磷、有效磷和全钾的变异信息。结果表明,对土壤养分肥力系统来说,本研究讨论的 7 个肥力指标在上述两个主成分上都有较高的权重,因此用这两个主成分就可以反映由上述 7 个肥力指标组成的综合指标所表征的土壤养分肥力水平的高低。

根据主成分及综合主成分的得分函数计算得到各采样片区 0~20 cm 土壤在各自两个主成分上的得分情况以及综合主成分得分(表 2)。参考李月芬等^[22]对土壤质量等级划分的方法,即根据综合主成分得分的最大值与最小值,选择适当的分值区间,对土壤肥力进行等级划分。结合表 2,按照等距 0.631 将土壤养分肥力划分为 3 种等级(表 3)。结果表明,第 2、4、7 采样片区归属一等肥力,第 1、3、6 采样片区归属二等肥力,剩下的 4 个采样片区可以归属三等肥力。

表 2 各主成分得分和综合主成分得分

Table 2 Principal component scores and comprehensive principal component scores

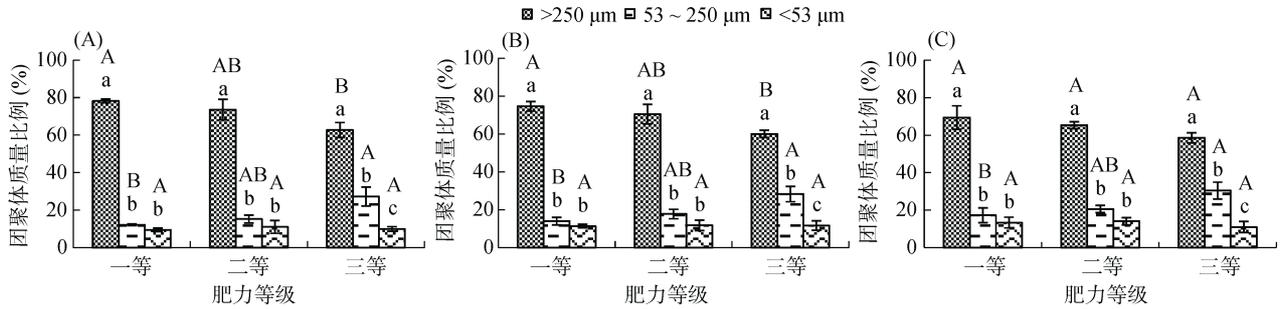
采样片区	PC1 得分	PC2 得分	综合得分(F)
1(鲁岗)	-0.135	1.386	0.198
2(赵岗)	1.082	0.579	0.795
3(司庄)	-0.050	0.153	0.000
4(应举)	0.469	1.647	0.629
5(姜堤)	-1.354	0.084	-0.829
6(曹岗)	0.468	-0.799	0.130
7(居厢)	1.754	-1.032	0.886
8(戚城)	-0.167	-1.394	-0.389
9(尹岗)	-0.649	-0.030	-0.412
10(潘店)	-1.418	-0.594	-1.008

表 3 土壤养分肥力等级划分
Table 3 Hierarchy of soil nutrient fertility

肥力等级	F 区间	等距	采样片区
一等	[0.255,0.886]	0.631	2,4,7
二等	[-0.376,0.255]	0.631	1,3,6
三等	[-1.008,-0.376]	0.631	5,8,9,10

2.2 土壤团聚体组成及其稳定性

2.2.1 团聚体的质量比例 从图 3 中可以看出,在 3 种肥力等级下,研究区域潮土大团聚体的质量比例为 59.12%~78.71%,显著高于其他粒级($P < 0.05$),而粉黏粒的质量比例最小,所占比例仅 8.81%~14.15%。与三等肥力相比,在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层,一等肥力土壤大团聚体的质量比例显著提高($P < 0.05$),提高率分别为 25.5% 和 20.0%,微团聚体的质量比例显著降低($P < 0.05$),下降率分别为 54.3% 和 43.5%;在 10~20 cm 土层,微团聚体的质量比例显著降低了



(图中小写字母表示同一肥力等级下团聚体的质量比例在不同粒级间差异显著($P < 0.05$), 大写字母表示同一粒级团聚体的质量比例在不同肥力等级间差异显著($P < 0.05$), 误差线表示标准误)

图 3 不同肥力等级下 0~5(A)、5~10(B)和 10~20 cm(C)土层团聚体的质量比例

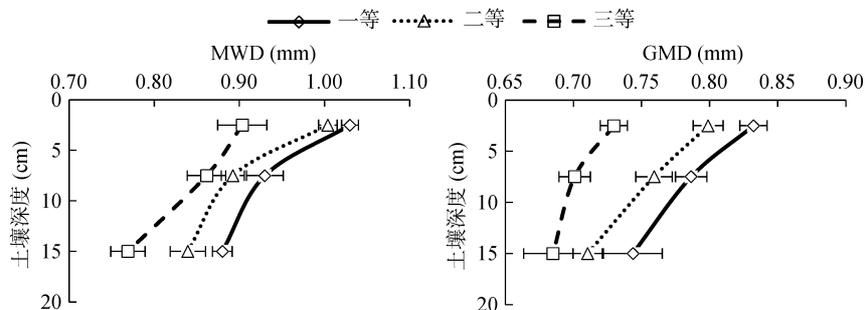
Fig. 3 Mass proportion (%) of aggregates in 0-5(A), 5-10(B) and 10-20 cm(C) soil layers under different fertility hierarchies

33.6% ($P < 0.05$), 大团聚体的质量比例随肥力等级提高有所增加, 但差异不显著。在 0~20 cm 土层, 一等肥力和二等肥力土壤团聚体的质量比例之间差异不显著, 并且粉黏粒的质量比例随肥力等级的变化不明显。从本研究 7 个肥力指标组成的养分肥力系统等级划分标准分析, 土壤肥力越高, 说明土壤中有有机质、全量以及有效态的氮磷钾素含量也就越高, 这些养分物质可能作为团聚体胶结剂, 促使土壤微团聚体和粉黏粒部分团聚在一起形成水稳性大团聚体^[5], 其中有机碳的作用尤为突出^[23]。这与 Six 等^[24]研究耕地、草原土壤有机质积累和团聚体数量及其周转的关系得出的结论基本一致。

与三等肥力土壤相比, 在 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层, 一等肥力土壤大团聚体的质量比例分别提高了 25.5%、20.0% 和 18.5%, 微团聚体的质量比例分别降低了 54.3%、43.5% 和 33.6%, 大团聚体和微团聚体数量的变化率均随着土壤深度增加而减小, 说明土壤养分肥力对团聚体的影响效应随着土壤深度增加而逐渐减弱。这可能与构成土壤肥力的各种养分含量随土壤深度增加而下降有关^[25], 因为这些养分是土壤中稳定性团聚体形成的胶结剂^[11]。有研究表明, 由于表土存在着干湿交替和冻融交替过程, 破坏了大

团聚体, 导致较深层大团聚体的质量比例高于表土层^[26-27]。本研究得出相反结果, 3 种肥力等级下大团聚体的质量比例随土壤深度增加逐渐减小, 而微团聚体的质量比例随土壤深度增加逐渐增大。这可能与当季作物生长所处的生物气候条件相关, 本试验开展于夏玉米收获季, 夏玉米生育期从 6 月初至 9 月底, 雨热同期, 最大程度上降低了干湿交替和冻融交替对大团聚体的影响程度。这也进一步说明了研究区域不同土层团聚体的分布主要受到各种肥力指标的影响。

2.2.2 团聚体的稳定性 由图 4 可以看出, 在 3 种肥力等级下, 土壤团聚体的 MWD 与 GMD 值均呈现出一等肥力 > 二等肥力 > 三等肥力的规律, 并且一等肥力与三等肥力土壤团聚体的稳定性之间差异显著 ($P < 0.05$), 这进一步证实了土壤结构稳定性是土壤肥力的重要组成部分之一^[28]。同时, 在高肥力土壤中, 各种土壤生物(包括动物和微生物)的数量及其活性相应较高, 促进了包裹在大团聚体内部的有机质与微团聚体胶结形成颗粒有机碳, 增加了其结构稳定性^[29]。此外, 随着土壤深度增加, 不同肥力等级下团聚体的 MWD 与 GMD 值均随之减小, 这与构成肥力系统的各种肥力指标在不同土层的分布规律有关^[25]。



(图中误差线表示 MWD 和 GMD 值的标准误)

图 4 不同肥力等级下 0~20cm 土层团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

Fig. 4 Mean weight diameters (MWD) and geometric mean diameters (GMD) of aggregates in 0-20 cm soil layers under different fertility hierarchies

2.3 土壤团聚体与养分肥力的关系

通过以上分析可知,土壤团聚化进程与土壤肥力密切相关。将大团聚体的质量比例和稳定性指数(MWD 和 GMD)分别与土壤养分肥力综合主成分得分 F 值进行回归分析,结果如图 5。大团聚体的质量

比例和团聚体的稳定性指数分别与 F 值呈线性函数关系,并且相关性均达到极显著性水平($P<0.01$),表明土壤肥力与团聚体特征之间存在着相互作用关系。作为反馈机制,大团聚体的质量比例以及团聚体的稳定性可以作为表征土壤肥力的重要指标^[1]。

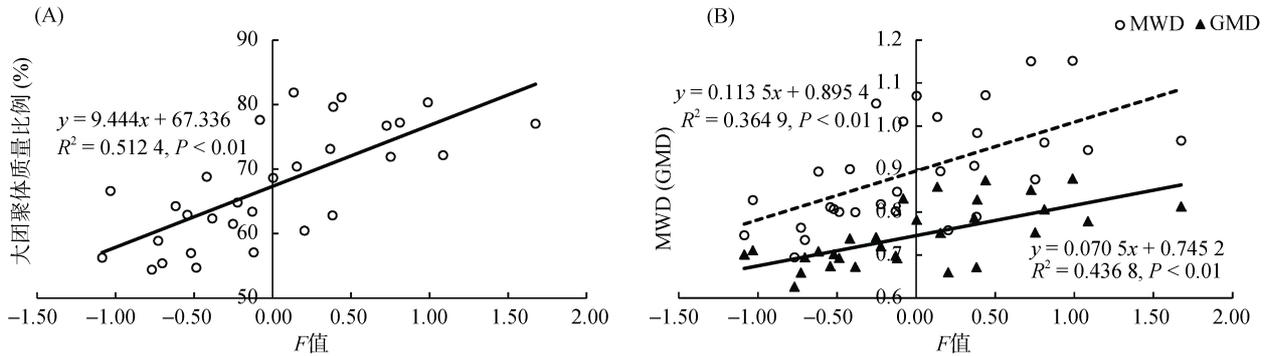


图 5 大团聚体的质量比例(A)和团聚体的稳定性指数(MWD/GMD)(B)与 F 值的关系
Fig. 5 Relationship between mass proportion of macro-aggregates (A), MWD/GMD (B) and F values

养分肥力系统由各种土壤肥力指标构成,将不同肥力等级下各团聚体的质量比例与相应的土壤肥力指标进行 Pearson 相关性分析(表 4)。结果表明,大团聚体的质量比例与土壤有机质、全氮和碱解氮含量显著正相关($P<0.05$);相反,微团聚体和粉黏粒的质量比例与它们呈负相关关系,并且前者达到显著性水平($P<0.05$),而 0~5 cm 土层微团聚体的质量比例也与全磷含量显著负相关($P<0.05$),说明这些养分离物质的累积可以促进土壤微团聚体团聚形成水稳性大团聚体。此外,随着土壤深度增加,土壤团聚体与养分之间的相关性逐渐减弱。在 5~10 cm 土层,大团聚体的质量比例与碱解氮含量之间由极显著正相关变为显著正相关,同时微团聚体的质量比例与有机质含量之间也由极显著负相关变为显著负相关,而且微团聚体的质量比例与碱解氮含量的相关性不显著;在

10~20 cm 土层,仅大团聚体的质量比例与全氮含量之间为极显著正相关关系,与有机质含量的相关性由极显著变为显著,而微团聚体的质量比例仅与全氮含量呈显著负相关关系。这一结果表明影响土壤团聚化过程的养分因子含量可能存在一个临界值,因为随土层加深,土壤养分含量下降,当养分含量低于该临界值时,土壤养分对土壤团聚化过程的影响程度将减小。

将 MWD 和 GMD 值分别与各种土壤肥力指标进行 Pearson 相关性分析(表 5)。在 0~20 cm 土层, MWD 和 GMD 值主要与土壤有机质、全氮和碱解氮含量显著正相关($P<0.05$),并且各土层 GMD 值与各肥力指标的相关性略好于 MWD 值。该结果表明,与其他肥力指标相比,土壤有机质、全氮和碱解氮的累积更有利于加快土壤团聚化进程。

表 4 团聚体的质量比例与各肥力指标之间的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between mass proportion of aggregates and fertility indexes

		有机质	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
0~5 cm	大团聚体	0.822**	0.776**	0.837**	0.626	0.522	-0.022	0.422
	微团聚体	-0.793**	-0.797**	-0.801**	-0.708*	-0.511	0.068	-0.503
	粉黏粒	-0.148	0.000	-0.168	0.181	-0.074	-0.128	0.193
5~10 cm	大团聚体	0.779**	0.822**	0.693*	0.491	0.374	0.129	0.274
	微团聚体	-0.648*	-0.822**	-0.604	-0.557	-0.370	-0.105	-0.481
	粉黏粒	-0.285	0.007	-0.194	0.152	-0.005	-0.052	0.466
10~20 cm	大团聚体	0.644*	0.783**	0.515	0.547	0.088	0.035	0.032
	微团聚体	-0.448	-0.673*	-0.311	-0.579	0.003	-0.033	-0.348
	粉黏粒	-0.242	-0.050	-0.281	0.171	-0.155	0.004	0.605

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关; **表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关,下同。

表 5 团聚体的稳定性(MWD/GMD)与各肥力指标之间的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between MWD, GMD and fertility indexes

		有机质	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
0~5 cm	MWD	0.478	0.402	0.697*	0.486	0.371	-0.336	-0.087
	GMD	0.690*	0.606	0.768**	0.509	0.479	-0.070	0.198
5~10 cm	MWD	0.487	0.477	0.453	0.202	0.204	0.042	-0.244
	GMD	0.740*	0.675*	0.640*	0.335	0.301	0.134	-0.019
10~20 cm	MWD	0.692*	0.778**	0.610	0.483	0.202	0.099	-0.026
	GMD	0.691*	0.725*	0.611	0.373	0.170	0.078	-0.189

通过以上分析可知,不同肥力等级下土壤团聚体的分布和稳定性存在差异,可能主要与土壤有机质、全氮和碱解氮含量相关。在 0~20 cm 土层,这些养分物质可能作为胶结剂,促使土壤团聚化过程发生。随着养分积累,粉黏粒转变成微团聚体,微团聚体再转变成大团聚体,或者粉黏粒直接团聚形成水稳性大团聚体^[30]。

3 结论

用两个主成分就可以反映由土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾等 7 个肥力指标组成的综合指标所表征的研究区域潮土养分肥力水平的高低。在研究区域内,潮土养分肥力与土壤团聚化过程密切相关。7 个肥力指标中,团聚体特征主要与有机质、全氮和碱解氮显著正相关,并且这种相关性随着土壤深度增加而逐渐减弱。在农业生产过程中,可以尝试改善各种管理措施,诸如耕作制度、施肥技术、灌溉方法以及秸秆还田等,促进土壤有机碳和氮素积累,使土壤结构良性发展,从而提升地力水平。

参考文献:

- [1] 熊毅. 土壤有机无机复合[M]//中国科学院南京土壤研究所编. 熊毅文集. 北京: 科学出版社, 2003: 307-374
- [2] Amézketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2): 83-151
- [3] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31
- [4] Plaza C, Courtier-Murias D, Fernández J M, et al. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: a central role for microbes and microbial by-products in C sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57(3): 124-134
- [5] Adesodun J K, Mbagwu J S C, Oti N. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates

- of an organic waste amended Ultisol in southern Nigeria[J]. Bioresource technology, 2005, 96(4): 509-516
- [6] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25
 - [7] Anderson I C, Buxton D R, Karlen D L, et al. Cropping system effects on nitrogen removal, soil nitrogen, aggregate stability, and subsequent corn grain yield[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(6): 881-886
 - [8] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1042-1049
 - [9] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124(4): 170-177
 - [10] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. Geoderma, 2010, 154(3): 364-369
 - [11] Liu X L, He Y Q, Zhang H L, et al. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 666-673
 - [12] 姜榕, 申思雨, 吕贻忠. 华北地区有机种植与常规种植土壤质量比较研究[J]. 土壤, 2015(4): 805-811
 - [13] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1350-1358
 - [14] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015(4): 828-838
 - [15] 邱佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1129-1138
 - [16] 张磊, 王嘉学, 代云川, 等. 滇东喀斯特地区红裸土表层团聚体稳定性及其影响因素研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 790-796
 - [17] 李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. 土壤学报, 2015(5): 1180-1187

- [18] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227–234
- [19] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106–195
- [21] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 277–280
- [22] 李月芬, 汤洁, 李艳梅. 用主成分分析和灰色关联度分析评价草原土壤质量[J]. *世界地质*, 2004, 23(2): 169–174
- [23] Soinne H, Hyväluoma J, Ketoja E, et al. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 1–9
- [24] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377
- [25] Luo Y J, Wang Z F, Gao M, et al. Effects of conservation tillage on organic carbon, nitrogen and enzyme activities in a hydric gley soil of Chongqing, China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5(1): 30–36
- [26] Degens B P, Sparling G P. Repeated wet-dry cycles do not accelerate the mineralization of organic C involved in the macro-aggregation of a sandy loam soil[J]. *Plant and Soil*, 1995, 175(2): 197–203
- [27] 张赛, 王龙昌. 保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 263–267
- [28] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384–393
- [29] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783
- [30] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163

Research on Relationship Between Soil Nutrient Fertility and Aggregation of Fluvo-aquic Soil Under Intensive Cultivation

ZHANG Xianfeng^{1,2}, ZHU Anning^{1*}, ZHANG Jiabao¹, YANG Wenliang¹, CHE Wei¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study is to investigate the relationship between soil nutrient fertility and aggregate characteristics under intensive cultivation. Soil organic matter, total and alkali-hydrolyzable nitrogen, total and available phosphorus, and total and available potassium were selected for Fluvo-aquic soil in Fengqiu County as fertility indexes to form nutrient fertility system. Soil fertility was divided into three grades (first-, second- and third-grades) by principal component analysis. The results showed that mass proportion of aggregates was ranked as macro-aggregate > micro-aggregate > the free silt + clay fraction under each kind of fertility level. Compared to the third-grade fertility, mass proportions of macro-aggregates of the first-grade fertility in 0–5 cm, 5–10 cm and 10–20 cm layers increased by 25.5%, 20.0% and 18.5%, respectively, while those of the micro-aggregates decreased by 54.3%, 43.5% and 33.6%, respectively. No significant differences existed in aggregate distributions between the first- and second-grade fertility. Soil macro-aggregates and aggregate stability had significant linear positive correlation with the *F*-measure from principal component scores, and had significant positive correlation with soil organic matter, total and alkali-hydrolyzable nitrogen, but the correlation weakened with increase of soil depth.

Key words: Intensive cultivation; Fluvo-aquic soil; Nutrient fertility; Aggregation; Correlation