DOI: 10.11766/trxb202511120539 CSTR: 32215.14.trxb202511120539
王稳稳，张义秋，王译，龚敏，尹宇行，吴新亮. 不同胶结类型土壤团聚体生态化学计量特征的粒径分异规律[J]. 土壤学报，2026，
WANG Wenwen, ZHANG Yiqiu, WANG Yi, GONG Min, YIN Yuhang, WU Xinliang. Differentiation of Ecological Stoichiometric Characteristics among Aggregate Size Classes for Soils in Contrasting Cementing Types[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

不同胶结类型土壤团聚体生态化学计量特征的粒径分异规律*

王稳稳[1]，张义秋[1]，王 译[1]，龚 敏[1]，尹宇行[1]，吴新亮[1,2]†

（1. 北京林业大学水土保持学院云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站，北京 100083 ； 2. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083）

摘 要：为揭示不同胶结类型土壤的生态化学计量特征随团聚体粒径的分异规律，选取有机胶结（黑土、褐土）和铁铝胶结（红壤、砖红壤）4 种土壤，采用湿筛分级结合理化分析方法，测定 8 个粒级（> 5、5～2、2～1、1～0.5、0.5～0.25、0.25～0.10、0.10～0.05 和< 0.05 mm）团聚体中有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比，并识别其影响因素。结果表明：随团聚体粒径减小，黑土与褐土中有机碳、全氮、碳氮比、碳磷比整体呈降低趋势；砖红壤中有机碳、全氮、碳磷比、氮磷比呈先降后升趋势，而红壤中各粒级团聚体生态化学计量指标分异不明显（变异系数 CV<8%）。团聚体中有机碳和全氮呈极显著线性关系（R^2=0.95），但二者与全磷关系随土壤类型差异明显。统计分析表明，相比颗粒组成，团聚体生态化学计量特征与金属氧化物关系更为密切，其中有机胶结型土壤主要受非晶形铁铝氧化物影响，而铁铝胶结型土壤主要受晶形氧化物影响；非晶形铁铝氧化物、晶形氧化铁和粉粒可以较好表征团聚体生态化学计量指标（*Adj-*R^2=0.72～0.92，*P*<0.001）。本研究从团聚体尺度系统阐明了土壤生态化学计量特征的空间异质性与调控因子，为深入理解土壤养分循环、固碳等生物地球化学过程提供了理论依据。

关键词：生态化学计量特征；土壤团聚体；有机胶结；铁铝胶结；金属氧化物

中图分类号： S157 **文献标志码**：A

Differentiation of Ecological Stoichiometric Characteristics among Aggregate Size Classes for Soils in Contrasting Cementing Types

WANG Wenwen[1], ZHANG Yiqiu[1], WANG Yi[1], GONG Min[1], YIN Yuhang[1], WU Xinliang[1,2]†

(1. *Jianshui Desert Ecosystem National Observation and Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2. *State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract:【Objective】Soil ecological stoichiometry provides critical insights into nutrient cycling, biogeochemical coupling, and soil development processes. In highly weathered soils, differences in cementation mechanisms

* 国家重点研发计划项目（2024YFD2200503）和国家自然科学基金项目（42677414）资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFD2200503）and the National Natural Science Foundation of China(No.42677414)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：wuxinlianghzau@163.com
作者简介：王稳稳（1999-），男，江苏连云港人，硕士研究生，主要从事土壤养分研究。E-mail：1797101446@qq.com

收稿日期：2025-11-20；收到修改稿日期：2026-09-14 ；网络首发日期（www.cnki.net）

(organic binding vs. Fe-Al oxide binding) may lead to distinct nutrient regulation patterns and element allocation strategies across aggregate size fractions. However, how soil aggregate size mediates the stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) under different cementation types remains poorly understood. Therefore, this study aimed to (i) investigate the variation patterns of C, N, and P contents and their molar stoichiometric ratios across aggregate size fractions; (ii) clarify the relationships between stoichiometric characteristics and metal oxides as well as particle-size composition; and (iii) reveal contrasting nutrient regulation mechanisms between organic-cemented soils and Fe-Al oxide-cemented soils.【Method】Four representative soils with contrasting cementation types were selected: two organic-cemented soils (Black soil and Cinnamon soil) and two Fe-Al oxide-cemented soils (Red soil and Latosol soil). Soil aggregates were fractionated into eight size classes (> 5, 5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, 0.25~0.10, 0.10~0.05, and < 0.05 mm) using wet sieving. Organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus were measured using standard analytical methods. Free and amorphous iron, aluminum, and manganese oxides were extracted by dithionite-citrate-bicarbonate (DCB) and acid ammonium oxalate methods, respectively. Stoichiometric ratios (C:N, C:P, and N:P) were calculated on a molar basis to eliminate atomic mass differences. Correlation analysis and stepwise regression analysis were conducted to identify the dominant controlling factors influencing stoichiometric variation across aggregate sizes.【Result】The results revealed that as aggregate size decreased, organic carbon, total nitrogen, C:N ratio, and C:P ratio in Black soil and Cinnamon soil generally showed decreasing trends; in Latosol, organic C, total N, C:P ratio, and N:P ratio first decreased and then increased, whereas in Red soil, the ecological stoichiometric indicators among aggregate size fractions showed no obvious differentiation (coefficient of variation, CV < 8%). Organic C and total N in aggregates showed a highly significant linear relationship (R^2 = 0.95), but their relationships with total P differed significantly among soil types. Statistical analysis indicated that, compared with particle-size composition, aggregate ecological stoichiometric characteristics were more closely related to metal oxides. Among them, organic-cemented soils were mainly affected by amorphous Fe-Al oxides, while Fe-Al oxide-cemented soils were mainly affected by crystalline oxides. Amorphous Fe-Al oxides, crystalline iron oxides, and silt could well characterize the aggregate ecological stoichiometric indicators ($Adj\text{-}R^2$ = 0.72~0.92, P < 0.001).【Conclusion】Soil aggregate size exerts significant influence on ecological stoichiometric characteristics, but its effects differ between cementation types. In organic-cemented soils (Black soil and Cinnamon soil), organic carbon, total N, C:N ratio, and C:P ratio showed significant decreasing trends with decreasing aggregate size, whereas in Fe-Al oxide-cemented soils (Red soil and Latosol), the size-dependent differentiation of ecological stoichiometric indicators among aggregates was relatively weak. Compared with particle-size composition, aggregate ecological stoichiometric characteristics were mainly controlled by Fe-Al oxides; among these, organic-cemented soils were dominated by amorphous oxides, while Fe-Al oxide-cemented soils were more strongly influenced by crystalline oxides. These findings advance the understanding of aggregate-scale nutrient regulation mechanisms and provide theoretical support for interpreting stoichiometric variation in different pedogenic environments.

Key words: Ecological stoichiometry; Soil aggregates; Organic binding；Fe-Al oxide binding; Metal oxides

碳、氮、磷是生物体最基本的生源要素，对维持生态系统结构和功能具有重要作用[1]。土壤生态化学计量特征以碳、氮、磷等元素的含量、形态及比例为核心，综合反映了土壤质量和肥力状态[2]，是评估土壤和生态系统养分限制、养分利用效率和养分循环的关键指标，为生态学、土壤学等领域研究提供新方法。

土壤有机碳与全氮主要源于生态系统有机物质的输入与分解过程，碳氮比（C:N）反映了有机质分解程度，而磷主要受母岩及其风化程度的影响[3]，碳磷比（C:P）可以衡量土壤有机质被微生物矿化释放磷或吸收固持磷的潜力，氮磷比（N:P）可作为氮素限制的诊断指标。受气候（气温、降水）、地形（如海拔、坡度）、生物、土壤性质（pH、质地、金属氧化物）等自然因素和人类活动影响，土壤生态化学计量特征呈现强烈的空间分异性[4-8]。通常有机

碳和全氮空间分异性较强，而全磷含量相对稳定[5]。在区域尺度上，气温和降水通过生物和地球化学过程影响碳、氮、磷及其化学计量指标[6]。Tian 等[8]对比不同气候区发现，高原寒区有机土的碳氮比最高，而暖温带变性土和新成土最低；热带亚热带区碳磷比和氮磷比最高，而温带荒漠区干旱土最低。除气温外，土壤碳、氮储量、碳氮比随 pH 和砂粒含量升高而降低，全磷随黏粒和粉粒含量增加而升高[7]。Jia 等[9]研究罗浮山山地土壤发现，容重、黏粒和铁氧化物是调控土壤生态化学计量特征海拔分异的主要土壤因子。总体而言，土壤生态化学计量特征空间变化的驱动因素表现出强烈的尺度依赖性[3-4]。

团聚体是土壤结构的基本组成单元，直接参与调控土壤侵蚀、养分循环、碳周转、生物活动等土壤过程[10-11]。团聚过程中通常伴随着有机质、金属氧化物、颗粒组成等物质的空间分异[12-13]。它们不仅是重要的胶结物质，也是碳氮磷元素的重要载体。因此，不同粒径团聚体中碳氮磷及化学计量比理应存在差异。研究表明，温带地区以有机质为主要胶结物质的土壤，有机碳、全氮和碳氮比随着团聚体粒径减小而降低；但对于热带亚热带地区铁铝胶结土壤，它们随团聚体粒径变化不明显[13-14]。Ge 等[15]发现受新输入磷累积和黏粒影响，黄土大团聚体和粉黏粒组分中磷含量高于微团聚体。然而，现有土壤生态化学计量空间变化研究大多基于全土，而对团聚体尺度上的粒径分异规律认识有限，而且相比碳氮，对磷的关注更少；此外，由于不同类型（或区域）土壤的团聚体形成胶结机制存在差异，其团聚体中生态化学计量特征的分异规律尚缺乏系统分析，这不利于准确认识宏观尺度上土壤养分循环、固碳等生态系统过程和功能[15]。

基于此，本文选取我国典型地带性土壤（黑土、褐土、红壤和砖红壤）为研究对象，通过湿筛分级和理化性质分析，探究不同胶结类型土壤碳、氮、磷及化学计量比随水稳性团聚体粒径的变化特征及影响因素，为深入理解生物地球化学循环过程和土壤养分供应状况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤采样

基于前期地带性土壤团聚体形成稳定机制相关研究[16-17]，自北向南选取典型地带性土壤黑土、褐土、红壤和砖红壤为研究对象，采样点分别位于中温带（黑龙江海伦市）、暖温带（河南省洛阳市）、亚热带（湖南省长沙市）和热带季风气候区（海南省海口市）。从黑土到砖红壤，土壤发育程度逐渐增加，其中黑土和褐土属于中等发育程度土壤，黏土矿物类型为蛭石、水云母，有机质是主要胶结物质；而红壤和砖红壤为强发育土壤，主要胶结物质为黏粒和铁铝氧化物。由于腐殖质层是植物凋落物输入与微生物转化最集中的区域，具有较高的有机碳和全氮含量，是土壤有机碳积累的重要层次[18-19]。同时，腐殖质层丰富的有机质与铁铝氧化物形成的矿物−有机质复合体对碳氮磷固持具有显著影响，并促进有机质中氮、磷的矿化与转化过程[20]。因此，根据标准化采样方法[21]，每种类型土壤分别采集林地腐殖质层，通过样方（50 m×50 m）内多点混合采集原状土样，采样过程尽可能保证质地、地形、土地利用方式一致。采样点信息如表 1 所示。为保证原状土壤结构在运输过程中不被挤压破坏，将其用特制塑料盒盛装运回实验室，然后在适宜湿度时沿自然破裂面小心掰开为 10 mm 左右土块，完全风干后过筛备用。

表 1 供试土壤采样点基本情况

Table 1 Basic information of sampling sites

土壤类型 Soil type	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	年均气温 Mean annual temperature/℃	海拔 Elevation/m	母质类型 Parent materials
黑土 Black soil	47°26'N	126°50'E	550	1.5	205～217	黄土状黏土
褐土 Cinnamon soil	34°48'N	112°36'E	595	14.2	343～385	马兰黄土
红壤 Red soil	28°29'N	112°54'E	1 428	17.4	53～73	第四纪红黏土
砖红壤 Latosol	19°52'N	110°34'E	1 656	24.5	13～30	玄武岩

1.2 团聚体湿筛分级

采用湿筛法分离获取不同粒级水稳性团聚体。具体过程为：首先，通过干筛法将 500 g 小于 10 mm 风干土进行振荡分级，计算风干团聚体粒径组成（>5、5～2、2～1、1～0.5、0.5～0.25、0.25～0.10 和< 0.10 mm）[22-23]。根据干筛结果，将各粒级团聚体按比例配成 50 g 土样用于湿筛。将 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm 套筛固定在振荡架上，加水至筛组上缘部分，保证湿筛过程筛子上缘不露出水面；将土样转移至套筛顶筛上，缓慢浸入水中保持 10 min，然后开动团粒分析仪振荡 30 min，频率设置为 30 r·min^{-1}，振幅 4 cm；将< 0.25 mm 团聚体依次过 0.10 mm 和 0.05 mm 筛子，将筛上团聚体转移至烧杯内烘干，对< 0.05 mm 团聚体水样静置，待颗粒沉降完成，将上层清水抽掉后收集沉降颗粒烘干称重（50℃），计算各粒级水稳性团聚体（>5、5～2、2～1、1～0.5、0.5～0.25、0.25～0.10、0.10～0.05 和< 0.05 mm）的百分含量。湿筛中每个土样设置 4 个重复。各粒级团聚体烘干后进行碳氮磷和其他理化性质分析。

1.3 土壤/团聚体理化性质分析

土壤/团聚体生态化学计量特征测定[21]：有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定；全氮采用凯氏定氮仪法测定；全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定。其中有机碳、全氮、全磷含量以 g·kg^{-1} 表示，为消除元素原子量差异影响，准确反映元素原子配比关系，并与现有生态化学计量研究保持一致[3,8]，土壤 C、N、P 化学计量比采用摩尔比计算。

土壤/团聚体其他理化性质采用常规分析方法测定[21]。其中，土壤容重采用环刀法测定；pH 按 1:2.5 土水比混合后电极法测定；土壤/团聚体的机械组成采用超声波分散后吸管法测定；游离态铁、铝、锰氧化物采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠浸提，非晶形铁、铝、锰氧化物采用草酸-草酸铵缓冲液浸提，浸提液稀释后用电感耦合等离子体发射光谱仪测定金属离子浓度。晶形氧化物含量通过计算游离态和非晶形氧化物含量差值获取。

1.4 数据处理

采用方差分析和最小显著性差异法（LSD）评估团聚体粒径对土壤生态化学计量特征的影响和差异性。采用变异系数（CV）反映生态化学计量特征及理化性质在团聚体粒级间分布的离散程度；利用皮尔逊相关分析和多元逐步回归分析量化团聚体生态化学计量特征指标与其他理化性质间的关系，采用方差膨胀因子（VIF）检验解释变量间的共线性。文中所有数据处理采用 IBM SPSS Statistics 20.0 和 Microsoft Excel 2013 软件进行。

2 结 果

2.1 土壤基本理化性质

供试土壤基本理化性质见表 2。供试土壤 pH 为 3.99～7.80，颗粒组成以黏粒（34%～72%）和粉粒（24%～60%）为主，容重为 1.06～1.28 g·cm^{-3}。有机碳、全氮、全磷分别为 12.4～

36.7 g·kg^{-1}、1.2～2.67 g·kg^{-1}、0.31～0.79 g·kg^{-1}，黑土有机碳和全氮含量明显高于其他土壤。黑土碳磷比、红壤氮磷比最高，而砖红壤碳磷比、氮磷比最低。从黑土到砖红壤，游离态氧化铁含量逐渐升高（9.61～114.06 g·kg^{-1}），而不同类型土壤间非晶形氧化物和氧化锰含量差异较小。

表 2 供试土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of tested soils

指标 Index		黑土 Black soil	褐土 Cinnamon soil	红壤 Red soil	砖红壤 Latosol
pH		6.22	7.80	3.99	4.39
容重 Bulk density/(g·cm^{-3})		1.22	1.28	1.13	1.06
有机碳 Organic carbon/(g·kg^{-1})		36.7	12.5	12.4	20.8
全氮 Total nitrogen/(g·kg^{-1})		2.67	1.20	1.47	1.60
全磷 Total phosphorus/(g·kg^{-1})		0.71	0.45	0.31	0.79
碳氮比 C∶N ratio		17:1	12:1	9:1	17:1
碳磷比 C∶P ratio		134:1	72:1	103:1	68:1
氮磷比 N∶P ratio		8:1	6:1	11:1	4:1
碳氮磷比 C∶N∶P ratio		134:8:1	72:6:1	103:11:1	68:4:1
机械组成 Mechanical composition/%	砂粒 Sand	9	6	7	4
	粉粒 Silt	51	60	42	24
	黏粒 Clay	40	34	51	72
非晶形氧化物 Amorphous oxides/(g·kg^{-1})	Fe	5.03	1.98	4.00	3.72
	Al	3.61	2.07	5.15	3.84
	Mn	1.07	0.62	0.95	0.65
游离态氧化物 Free oxides/(g·kg^{-1})	Fe	9.61	11.79	40.92	114.06
	Al	3.21	1.55	12.23	28.56
	Mn	0.74	0.61	0.95	1.13

除红壤外，其他土壤中水稳性团聚体含量随粒径减小呈现先升后降趋势。黑土中 2～1 mm 团聚体含量最高（21.7%），＞5 mm 团聚体含量最低；褐土中 0.10～0.05 mm 团聚体含量最高（24.1%），＞0.05 mm 团聚体含量随着粒径减小而增加；砖红壤中 1～0.5 mm 和 2～1 mm 团聚体含量最高（22.6%）。相比而言，红壤水稳性团聚体含量随粒径减小总体呈下降的趋势。

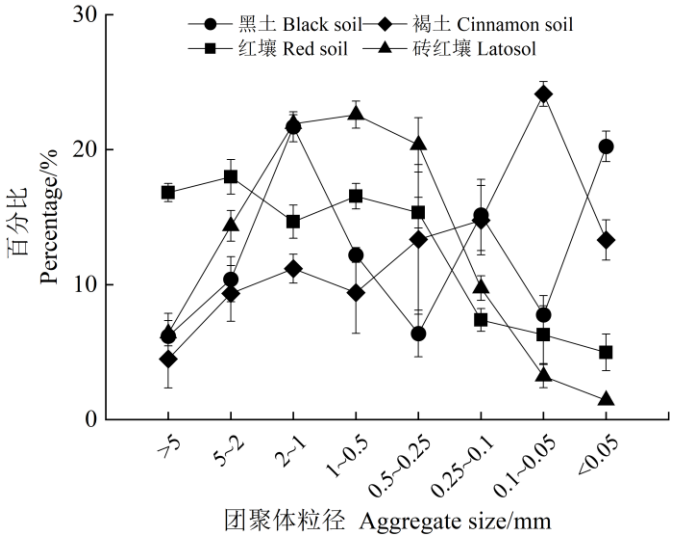


图 1 不同类型土壤水稳性团聚体粒径分布

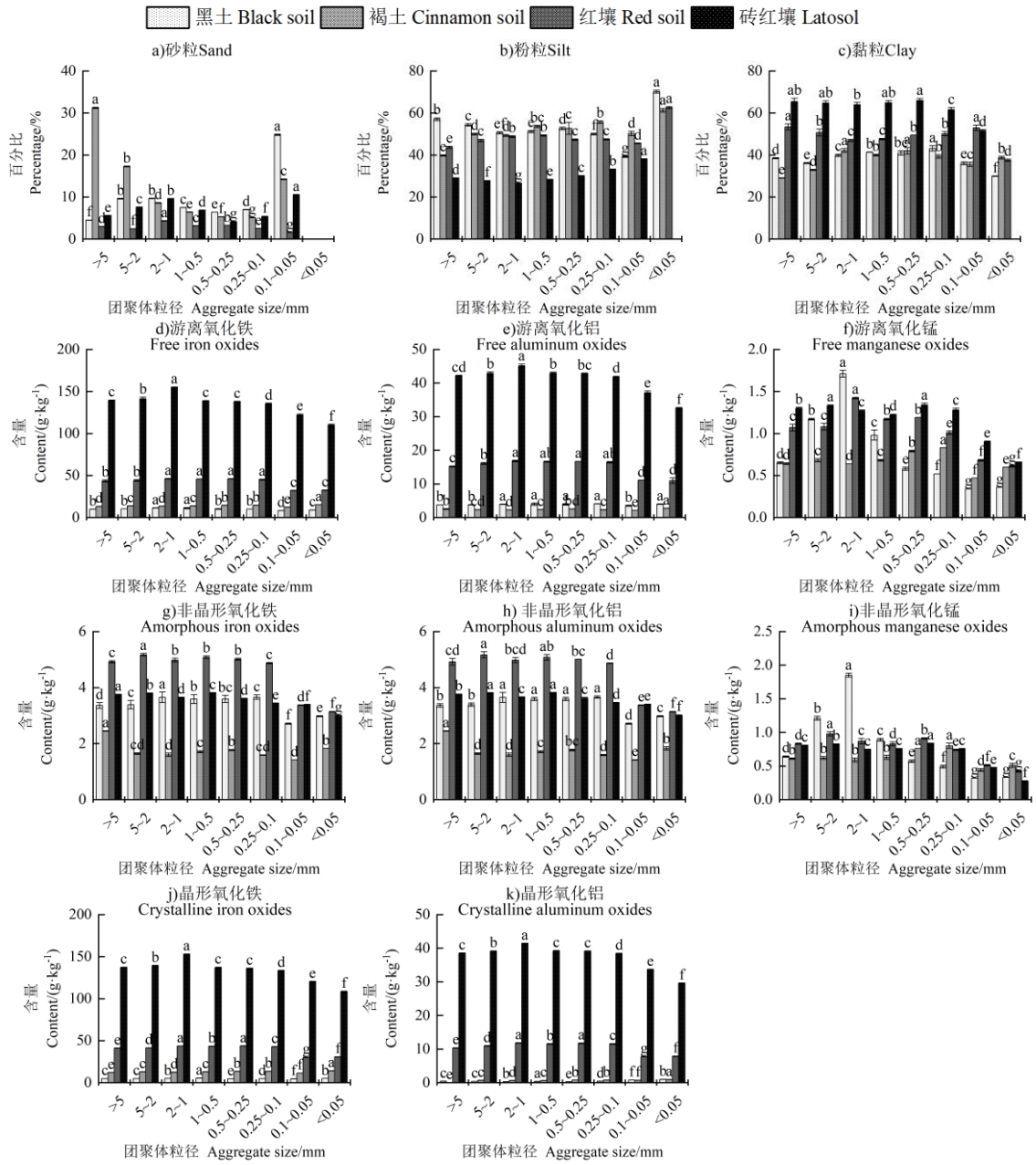
Fig. 1 The size distribution of water-stable aggregates of different soil types

2.2 团聚体中颗粒组成和金属氧化物随粒径的变化

团聚体颗粒组成方面（图 2），砂粒在褐土> 0.05 mm 团聚体粒径间变异性最大（5.1%～31.2%），其次为黑土（4.0%～24.8%）；所有土壤中粉粒在> 0.05 mm 团聚体间变异较小，其含量显著低于< 0.05 mm 团聚体；相比砂粒和粉粒，黏粒含量随团聚体粒径的变异性最小（CV=8%～12%）。

对于游离氧化物而言，黑土、砖红壤氧化铁以及红壤和砖红壤氧化铝含量随团聚体粒径减小呈先增后减趋势，红壤< 0.10 mm 团聚体中氧化铁含量显著低于> 0.10 mm 团聚体，而褐土氧化铁和黑土、褐土氧化铝含量粒径间分异较小（CV<7.9%）；黑土、红壤 2～1 mm 团聚体中氧化锰含量显著高于其他粒径团聚体，砖红壤< 0.10 mm 氧化锰含量显著低于> 0.10 mm 团聚体，而褐土粒径间分异不明显（0.47～0.83 $g \cdot kg^{-1}$）。

对于非晶形氧化物，黑土、红壤氧化铁和褐土氧化锰含量随团聚体粒径减小呈先增后减趋势，黑土、红壤氧化铝和褐土氧化锰含量在< 0.10 mm 团聚体中显著低于> 0.10 mm 团聚体，红壤、砖红壤氧化锰含量在< 0.50 mm 团聚体中迅速下降，而褐土、砖红壤氧化铁铝含量粒径间分异较小（CV<9.8%）。对于晶形氧化物，砖红壤氧化铁含量随团聚体粒径减小呈先增后减趋势，红壤氧化铁铝和砖红壤氧化铝在< 0.10 mm 团聚体中的含量显著低于> 0.10 mm 团聚体。



注：不同小写字母表示相同土壤不同粒径团聚体间差异显著(P<0.05)，下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among aggregates of different particle sizes within the same soil (P<0.05).The same below.

图 2 不同类型土壤团聚体金属氧化物与颗粒组成随粒径变化

Fig. 2 Changes in metal oxides and particle composition of soil aggregates across particle sizes in different soil types

2.3 团聚体生态化学计量特征随粒径的变化

团聚体粒径对有机碳、全氮、全磷含量的影响存在差异程度，对有机碳含量影响最大，对全磷含量影响最小，其中有机碳和全氮受团聚体粒径的影响由大到小为：黑土>褐土>砖红壤>红壤。化学计量比中，C:P 受团聚体粒径影响最大，其次为 N:P。对于 C:N，顺序为黑土>砖红壤>红壤>褐土；对于 C:P，顺序为褐土>黑土>砖红壤>红壤；对于 N:P，顺序为砖红壤>褐土>红壤>黑土。

对于黑土，＞0.10 mm 团聚体中有机碳和全氮含量随着粒径减小缓慢降低，但显著高于＜0.10 mm 团聚体；＞0.10 mm 团聚体间全磷差异不明显（0.56～0.76 g kg^{-1}）；除＜0.05 mm 外，C:N、C:P 和 N:P 在其他粒径间差异很小（CV=3%～5%）。对于褐土，除全磷外，<2

mm 团聚体的化学计量指标随粒径减小显著降低。相比其他土壤，红壤有机碳、全氮、全磷含量在团聚体粒径间差异最小（CV=3%～9%），但< 0.10 mm 的 C:N 和 C:P 显著低于> 0.10 mm 团聚体。砖红壤中有机碳、全氮和 C:P 随团聚体粒径减小呈先缓慢降低后升高的变化，其中在< 0.25 mm 范围内升高趋势尤为明显，全磷含量随粒径减小呈现缓慢降低变化，< 0.05 mm 的 C:N 显著低于其他粒径。

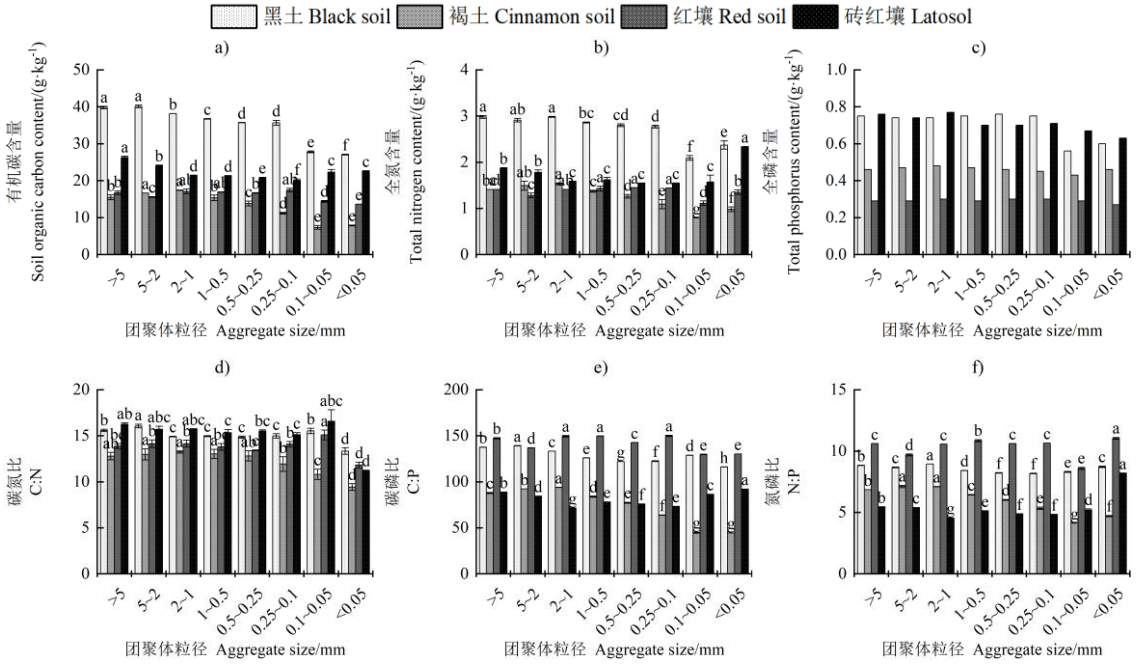
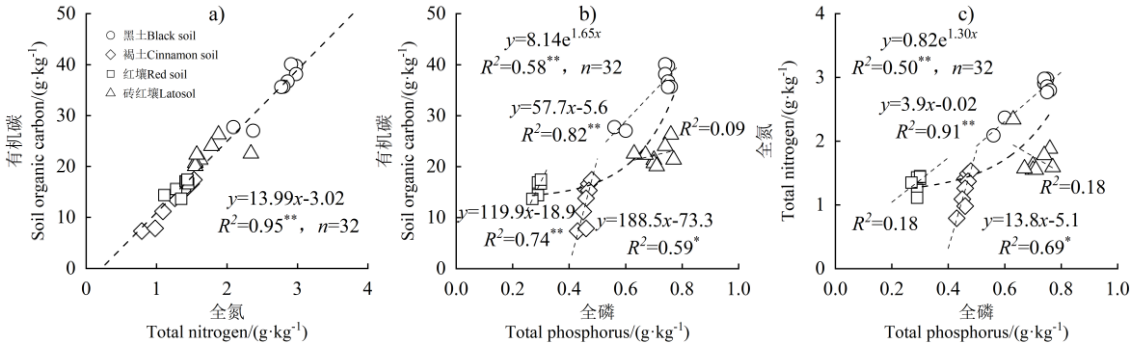


图 3 不同类型土壤生态化学计量特征随团聚体粒径的变化

Fig. 3 Variation in ecological stoichiometric characteristics of different soil types with aggregate size

2.4 团聚体中碳、氮、磷含量间的关系

如图 4 所示，不考虑土壤类型（n=32），团聚体中有机碳、全氮、全磷含量间均存在显著相关性（P<0.01）；其中有机碳与全氮含量呈极显著线性关系（R^2=0.95，图 4a）；有机碳与全磷、全氮与全磷分别呈指数关系（R^2=0.58 和 0.50，图 4b、图 4c）。在不同类型土壤中，黑土与红壤的有机碳和全磷呈良好线性关系（R^2=0.82 和 0.74，P<0.01），但仅黑土的全氮与全磷呈极显著线性关系（R^2=0.91，P<0.01）。



注：*和**分别表示显著性水平 P<0.05 和 P<0.01。Note: * and ** represent significance at P<0.05 and P<0.01 levels.

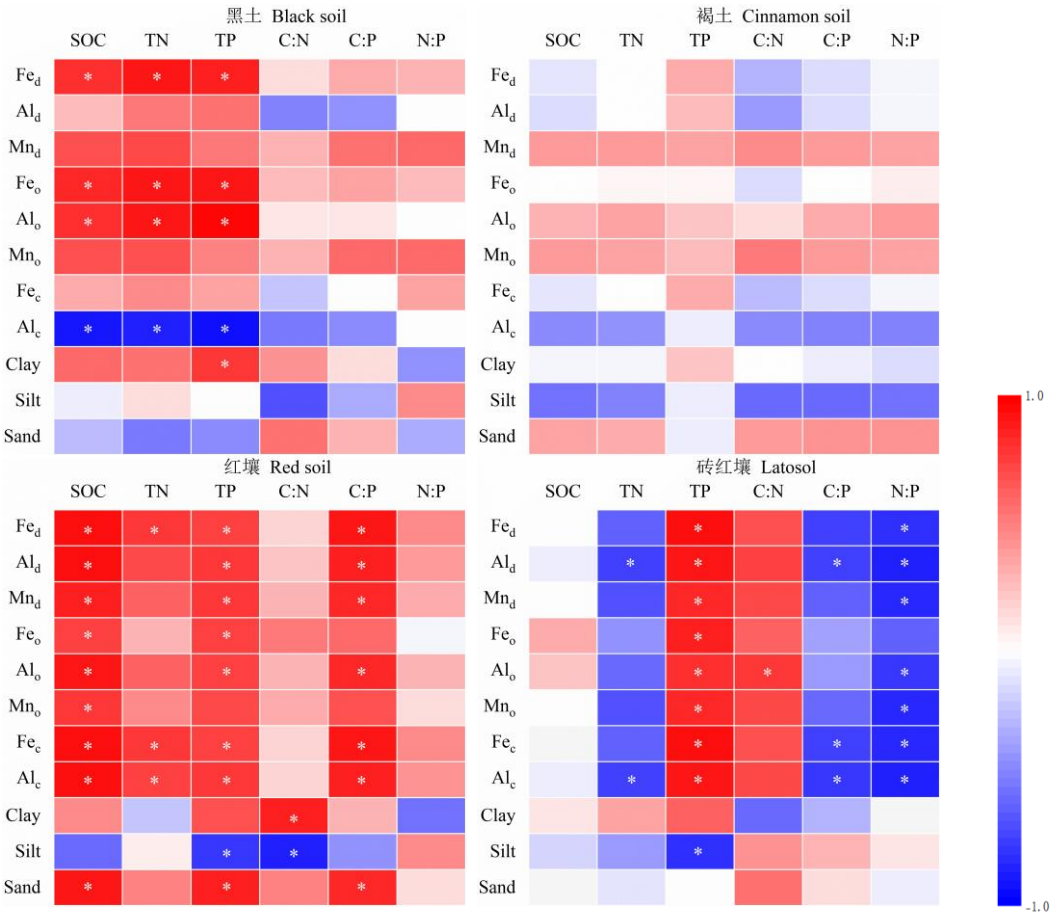
图 4 不同类型土壤团聚体碳、氮、磷含量间的关系

Fig. 4 Relationships among carbon, nitrogen, and phosphorus content in soil aggregates for different soil types

2.5 团聚体生态化学计量特征与金属氧化物和颗粒组成间的关系

相关分析表明（图 5），团聚体生态化学计量特征与其他理化性质间相关关系随土壤类

型存在差异。对于黑土，有机碳、全氮、全磷与游离氧化铁、非晶形铁铝氧化物呈正相关关系（r=0.78～0.95，P<0.05），与晶形氧化铝呈负相关关系（r=-0.92～-0.86，P<0.01）；全磷与黏粒含量呈正相关关系（r=0.73，P<0.05）。褐土团聚体的生态化学计量特征与其他理化性质间相关性均不显著（P>0.05）。红壤团聚体有机碳、全磷、C:P 与所有形态金属氧化物（尤其晶形铁铝氧化物）、砂粒呈正相关关系（r=0.71～0.93，P<0.05），全氮主要和晶形铁铝氧化物呈正相关关系（r=0.73 和 0.75，P<0.05），C:N 分别与黏粒和粉粒呈正相关和负相关关系（r=0.86 和-0.86，P<0.01）。砖红壤团聚体全磷与晶形铁铝氧化物呈极显著正相关关系（r=0.87～0.92，P<0.01），而 N:P 与其呈现负相关关系（r=-0.86～-0.80，P<0.05）；全氮、C:P 和游离态与晶形氧化铝呈负相关关系（r=-0.74～-0.71，P<0.05）。



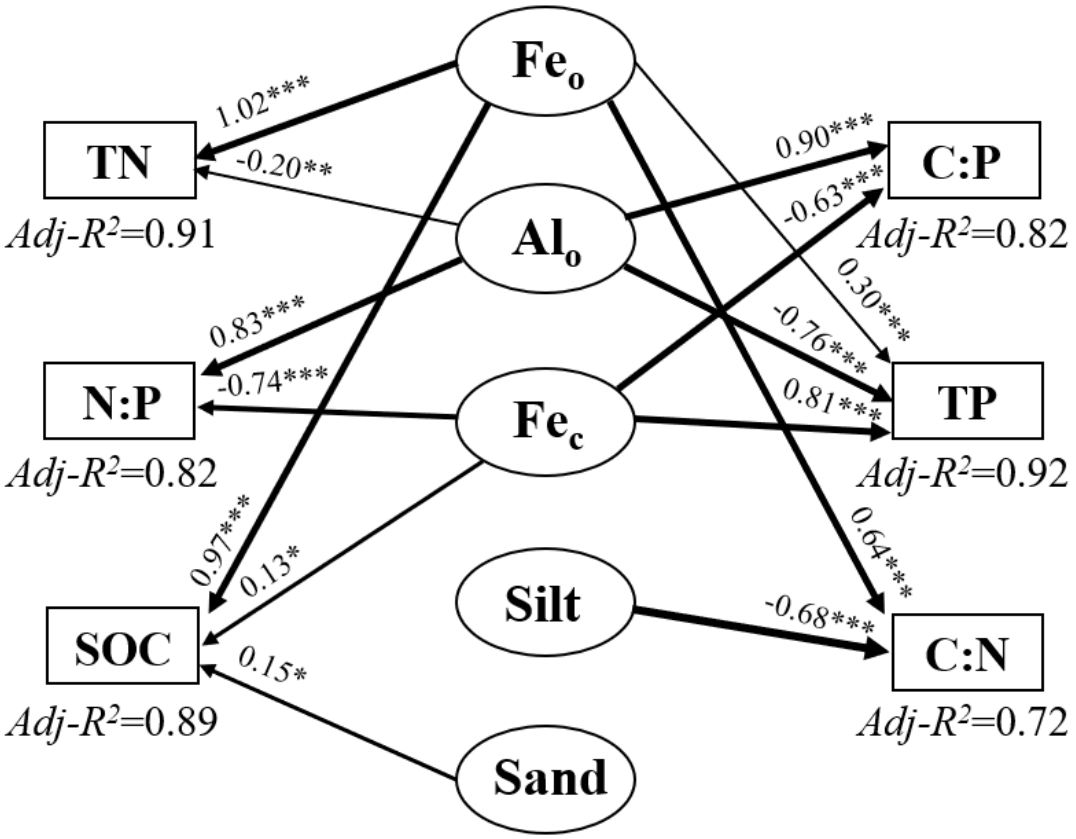
注：*表示显著性水平 P<0.01。Fe_d、Al_d、Mn_d 表示游离态铁、铝、锰氧化物；Fe_o、Al_o、Mn_o 表示非晶形铁、铝、锰氧化物；Fe_c、Al_c 表示晶形铁、铝氧化物；Sand、Silt、Clay 表示砂粒、粉粒、黏粒。Note: * indicate the significance levels at P<0.01. Fe_d, Al_d and Mn_d represent free iron, aluminum, and manganese oxides, respectively; Fe_o, Al_o and Mn_o denote amorphous iron, aluminum, and manganese oxides; Fe_c and Al_c indicate crystalline iron and aluminum oxides.

图 5 土壤团聚体生态化学计量特征与金属氧化物、颗粒组成间的相关性分析

Fig. 5 Correlation between ecological stoichiometric characteristics and metal oxides and particle size composition in soil aggregates

逐步回归分析结果（图 6）表明（VIF=1.03～1.45），当不考虑土壤类型时，颗粒组成和铁铝氧化物可以较好表征团聚体生态化学计量特征（Adj-R^2=0.72～0.92，P<0.001）。对于有机碳和全氮，除非晶形氧化铁的主效应（R^2=0.87 和 0.88，P<0.001），砂粒和晶形氧化铁对有机碳具有促进作用（R^2=0.02 和 0.02，P<0.05），而非晶形氧化铝对全氮发挥负向作用（R^2=0.04，P<0.01）。对于全磷，晶形和非晶形氧化铁发挥促进作用（R^2=0.23 和 0.30，

P<0.001），而非晶形氧化铝则发挥负向作用（R^2=0.40，P<0.001）。对于 C:N，非晶形氧化铁和粉粒含量分别发挥正向和负向作用（R^2=0.40 和 0.34，P<0.001）。对于 C:P 和 N:P，非晶形氧化铝和晶形氧化铁分别发挥正向和负向作用（R^2=0.48 和 0.35，P<0.001）。



注：*Adj-R*² 为调整 R^2；*，**和***分别表示显著性水平 P< 0.05, P< 0.01 和 P<0.001；箭头上的数字为标准系数；箭头粗细代表影响强度；Fe_o 和 Al_o 分别表示非晶形铁、铝氧化物；Fe_c 表示晶形铁氧化物；Silt 和 Sand 分别表示粉粒和砂粒。Notes: *Adj-R*² denotes the adjusted coefficient of determination; *, **, and *** represent significance at P<0.05, P<0.01, and P<0.001 levels, respectively. Standardized coefficients are displayed adjacent to arrows. Fe_o and Al_o refer to amorphous iron and aluminum oxides, respectively; Fe_c refers to crystalline iron oxides.

图 6 团聚体生态化学计量特征与颗粒组成和铁铝氧化物间的逐步回归分析结果

Fig. 6 Results of stepwise regression analysis between ecological stoichiometric characteristics and metal oxides and particle size composition in soil aggregates

3 讨 论

本研究发现，土壤生态化学计量特征随团聚体粒径的变化不仅因指标而异，而且受土壤类型的影响。对于黑土和褐土，有机碳、全氮、碳氮比、碳磷比总体随团聚体粒径减小而降低，砖红壤中仅有机碳、全氮、碳磷比、氮磷比呈先降后升变化，而红壤中所有生态化学计量指标粒径分异不明显。土壤类型间团聚体生态化学计量特征分布趋势不同很大程度上可以归结于胶结类型的差异。温带土壤（黑土和褐土）以有机质为主要胶结物质，根据“团聚层级理论”，新鲜易降解有机质（高碳氮比）可以促进大团聚体形成[13,24-25]；而热带亚热带土壤（红壤和砖红壤）中，铁铝氧化物大量富集，其胶结稳定能力强于有机质，因此有机质在团聚体形成与稳定中作用有限[14,25]。

不同胶结类型土壤的团聚体有机碳与全氮均呈良好线性关系（图 4a），这与全土尺度上研究结果一致[4-5]，表明团聚体中二者都依附于土壤有机物质。相比而言，全磷与有机碳和全氮相关性相对较弱，而且因土壤类型而异，这在一定程度上反映了不同类型土壤团聚体中磷素形态存在差异。土壤中磷可分为有机磷与无机磷，它们通过共沉淀或吸附与钙、铁、铝等氧化物结合[26]。黑土团聚体的全磷与有机碳、全氮呈现良好线性关系（图 4b、图 4c），表明其以有机磷为主，这和土壤中丰富有机质有关；而铁铝胶结土壤（如红壤和砖红壤）和低有机质褐土团聚体则以无机磷为主。通常，高度风化的酸性土壤（如红壤和砖红壤）中磷酸盐以 Al-P 和 Fe-P 为主，而中性土壤（如褐土）则以 Ca-P 为主[27]。未来可强化磷素分级研究以细化团聚体尺度上磷素形态空间分异性。

相比颗粒组成，团聚体生态化学计量特征与金属氧化物关系更为密切，尤其是非晶形铁铝氧化物。这与 Ge 等[15]和 Liu 等[5]强调细颗粒作用的结果不同，造成这种差异的原因为：一方面是由于前人研究在团聚体尺度较少考虑金属氧化物的影响，另一方面可能与本研究土壤均为黏质土有关。相比黏粒，铁铝氧化物具有更大的比表面积和电荷密度，其对有机质和养分的吸附结合能力更强[28-30]。相比晶形氧化物，非晶形氧化物的活性更高，比表面积更大，故而与团聚体生态化学计量指标间关系更紧密。在有机胶结土壤中，有机质主要通过与非晶形铁铝氧化物结合形成有机-矿物复合体[13]，它们不仅可以促进团聚体形成，同时提供了大量的吸附位点，促进氮磷固定[30-31]。对比黑土和褐土团聚体生态化学计量特征与理化性质间关系可以发现，有机质丰度是影响有机胶结型土壤团聚体生态化学计量特征的重要因素。

不同于有机胶结型土壤，铁铝胶结型土壤中团聚体全磷与晶形铁铝氧化物相关性更为密切，这与土壤中较高含量的晶形氧化物有关（图 2j、图 2k），氧化铁胶膜可以将磷酸根包被形成闭蓄态磷[32]。相比全磷，红壤团聚体中有机碳和晶形铁铝氧化物的关系更为密切，反映了金属氧化物对有机碳的固定能力高于对磷素的固定能力。此外，砖红壤中氮磷比与游离态和晶形金属氧化物呈负相关关系，反映了铁铝氧化物主导的养分调控模式，这不同于有机胶结型土壤中以有机质主导的调控模式[13,31]，而是一种以矿物相主导的“磷强化固定−氮相对流失”型调控方式。由于铁铝胶结型土壤常常处于强酸性和淋溶环境，这种环境易导致氮素挥发、淋失，而磷以铁铝结合态磷形式大量保存[33-34]，因此土壤中过高的金属氧化物含量可能使得团聚体尺度上的微环境面临氮限制的风险。

除金属氧化物主效应外，砂粒和粉粒分别对团聚体中有机碳和碳氮比发挥一定正向和负向作用，这与前人研究中报道的砂粒对氮磷固定的负向作用略有不同[15]。这也反映了团聚体中碳氮磷的固存由颗粒组成和金属氧化物等物质综合调控，除物质表面直接吸附作用外，团粒结构的物理隔离保护也可能发挥作用，未来应深化团聚体尺度上土壤生态化学计量特征空间分异的调控机制研究。

4 结 论

本研究明确了团聚体尺度上不同胶结类型土壤生态化学计量指标的空间分异特点及其影响因素，结论如下：有机胶结型土壤中（黑土、褐土）有机碳、全氮、碳氮比、碳磷比随团聚体粒径减小呈显著降低趋势；而铁铝胶结型土壤（红壤、砖红壤）中，团聚体间生态化学计量指标的粒径分异性较小。与颗粒组成相比，团聚体生态化学计量特征主要受铁铝氧化物调控，其中有机胶结型土壤以非晶形氧化物为主，而铁铝胶结型土壤则受晶形氧化物影响更大。未来应加强在团聚体尺度上土壤生态化学计量特征和养分形态的空间异质性和调控机制研究，以更好地认识宏观尺度生物地球化学循环过程和指导土壤肥力管理。

参考文献（References）

[1] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.

[2] Du Y N, Li T Y, He B H, et al. Stoichiometric characteristics of purple sloping cropland under long-term fertilization and cultivation[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 394-402. [杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 394-402.]

[3] Hui D F, Yang X T, Deng Q, et al. Soil C: N: P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations[J]. Catena, 2021, 201: 105228.

[4] Qiao Y, Wang J, Liu H M, et al. Depth-dependent soil C-N-P stoichiometry in a mature subtropical broadleaf forest[J]. Geoderma, 2020, 370: 114357.

[5] Liu F T, Wang X Q, Chi Q H, et al. Spatial variations in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus contents and controlling factors across the “Three Rivers” regions of southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148795.

[6] Zheng S M, Xia Y H, Hu Y J, et al. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil: Effects of agricultural land use and climate at a continental scale[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104903.

[7] Tan Q Q, Chen Y Z, Wang G A. Coupling and decoupling of soil carbon, nitrogen, phosphorus and potassium stocks along a 6, 000-km northeast-southwest temperature gradient in China[J]. Pedosphere, 2026, 36(2): 568-579.

[8] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China’s soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.

[9] Jia C J, Wu G, Lu Y, et al. Stoichiometry characteristics of C, N, and P of soil profiles along an altitude gradient in Luofu Mountain, Guangdong[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2023, 32(3): 2669-2677.

[10] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. Geoderma, 2018, 314: 122-137.

[11] Yudina A, Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores[J]. Geoderma, 2023, 434: 116478.

[12]Qiao S Y, Li X, Wang C Y, et al. Size differentiation patterns of metal oxides in soil aggregates with different cementation types[J/OL]. Science of Soil and Water Conservation, 2026,1-16. [谯思懿,李璇,王辰玉,等. 不同胶结类型土壤团聚体中金属氧化物的粒径分异规律[J/OL].中国水土保持科学,1-16]

[13] 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.

[14] Peng X, Yan X, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 89-98.

[15] Ge N N, Wei X R, Wang X, et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 172: 148-157.

[16] Wu X L, Wei Y J, Cai C F, et al. Quantifying the contribution of phyllosilicate mineralogy to aggregate stability in the East Asian monsoon region[J]. Geoderma, 2021, 393: 115036.

[17] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-South China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 54-66.

[18] Hu Y L, Deng Q, Kätterer T, et al. Depth-dependent responses of soil organic carbon under nitrogen deposition[J]. Global Change Biology, 2024, 30(3): e17247.

[19] Man H R, Dong X F, Li M, et al. Spatial distribution and influencing factors of humus layer thickness of forest land in permafrost region of Northeast China[J]. Catena, 2023, 224: 106979.

[20] Spohn M. Preferential adsorption of nitrogen- and phosphorus-containing organic compounds to minerals in soils: A review[J]. Soil Biology＆Biochemistry, 2024, 194: 109428.

[21] Oades J, Waters A. Aggregate hierarchy in soils[J]. Aust J Soil Res, 1991, 29: 815-828.
[22] Fernández-Ugalde O, Barré P, Hubert F, et al. Clay mineralogy differs qualitatively in aggregate-size classes: Clay-mineral-based evidence for aggregate hierarchy in temperate soils[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(4): 410-422.
[23] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
[24] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1991, 29(6): 815-828.
[25] Tian Y H, Xu Y, Hou J T, et al. Advances in understanding the interaction between soil iron oxides and organic carbon and its effect on carbon stabilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(3): 676-690. [田熠辉, 许运, 侯静涛, 等. 土壤铁氧化物与有机碳的耦合机制及其对碳固持的研究进展[J]. 土壤学报, 2026, 63(3): 676-690.]
[26] Ai J J, Banfield C C, Shao G D, et al. What controls the availability of organic and inorganic P sources in top- and subsoils　A 33P isotopic labeling study with root exudate addition[J]. Soil Biology ＆Biochemistry, 2023, 185: 109129.
[27] Liu J, Yang J J. Molecular speciation of phosphorus in agricultural soils: Advances over the last 30 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 558-567. [刘瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 558-567.]
[28] Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1297-1308. [谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1297-1308.]
[29] Pronk G J, Heister K, Kögel-Knabner I. Iron oxides as major available interface component in loamy arable topsoils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2158-2168.
[30] Zhao Q, Callister S J, Thompson A M, et al. Strong mineralogic control of soil organic matter composition in response to nutrient addition across diverse grassland sites[J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 137839.
[31] Yang X Y, Chen X W, Yang X T. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 85-91.
[32] Zhang L, Wu N, Wu Y, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1775-1782. [张林, 吴宁, 吴彦, 等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.]
[33] Yang J, Guo W Q, Zhao C S, et al. Increased soil soluble nitrogen stocks and decreased nitrogen leaching loss in rice paddy soil by replacing nitrogen fertilizer with Chinese milk vetch[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 715.
[34] Yi C X, Zhu J, Chen L H, et al. Speciation of iron and aluminum in relation to phosphorus sorption and supply characteristics of soil aggregates in subtropical forests[J]. Forests, 2023, 14(9): 1804.

（**责任编辑：**檀满枝）